



UNIVERSIDAD
TECNOLÓGICA
DEL PERÚ

Facultad de Ingeniería

Carrera de Ingeniería Eléctrica y de Potencia

Tesis:

**“EVALUACIÓN Y ANÁLISIS DE LA
CALIDAD DE PRODUCTO BAJO LOS
EFECTOS DE LAS TENSIONES Y
CORRIENTES ARMÓNICAS EN UN
PUNTO DE ACOPLAMIENTO COMÚN
(PAC)”**

Autor: **Gonzales Retamoso, Cirilo.**

Para optar el título profesional de

Ingeniero Eléctrico y de Potencia

Asesor: Raúl Gilberto Matos Acuña

Lima, octubre 2019

DEDICATORIA

A Dios, por permitirme llegar hasta esta etapa tan importante de mi formación profesional, de igual manera a la empresa Electro Sur Este. S.A.A., por haberme permitido desenvolverse profesionalmente en la Oficina Control de Calidad de Energía.

**“EVALUACIÓN Y ANÁLISIS DE LA CALIDAD DE PRODUCTO BAJO LOS EFECTOS
DE LAS TENSIONES Y CORRIENTES ARMÓNICAS EN UN PUNTO DE
ACOPLAMIENTO COMÚN (PAC)”**

RESUMEN

Para el desarrollo del presente estudio de tesis hacemos un análisis de investigación y evaluación de calidad de producto en especial los armónicos existentes en las redes eléctricas, y los efectos ocasionados en los equipos eléctricos por los armónicos de tensiones y corrientes en los sistemas eléctricos,

En consecuencia, a tales efectos, es necesario plantear métodos de solución y desplegar estudios de ingeniería eléctrica que permita evaluar, analizar y controlar el comportamiento de cargas no lineales que son generados por la utilización de dispositivos electrónicos, para poder asegurar que los niveles de distorsiones armónicas se encuentre dentro de las tolerancias establecidas en la (NTCSE), De este modo el estudio del comportamiento armónico de sistemas eléctricos se ha hecho cada vez más importante, al punto de convertirse en una necesidad de planificación, diagnóstico y operación.

Haciendo un mayor énfasis en, el análisis de las mediciones de armónicos realizadas en el HOSPITAL REGIONAL DE CUSCO, procedemos a plantear, métodos de solución, para mitigar uno armónico de quinto orden, concluyendo que una de las alternativas más eficaces para tal problema de armónico es el diseño de un filtro armónico del tipo pasivo.

ÍNDICE

Título de la tesis.....	III
Resumen.....	IV
Índice.....	V
Introducción.....	XIII

CAPÍTULO 1.- PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1 Determinación del Problema.....	1
1.2 Formulación del Problema.....	3
1.3 Justificación de la Investigación.....	4
1.4 Objetivos de la Investigación.....	5
1.4.1 Objetivo General.....	5
1.4.2 Objetivos Específicos.....	5
1.5 Planteamiento de la Hipótesis.....	6
1.5.1 Hipótesis General.....	6
1.5.2 Hipótesis Específico.....	6
1.6 Alcances y Limitaciones.....	7
1.6.1 Alcances.....	7
1.6.2 Limitaciones.....	7
1.7 Factibilidad.....	7
1.7.1 Económico.....	7
1.7.2 Técnico.....	8
1.7.3 Operativo.....	8

CAPÍTULO 2.- MARCO TEÓRICO

2.1 Antecedentes.....	9
2.2 Aspectos Normativos.....	11

2.2.1 Norma Técnica de Calidad de los Servicios Eléctricos (NTCSE).....	11
2.2.1.1 Como Calidad de Suministro.....	12
2.2.1.2 Como Calidad de Producto.....	13
2.2.1.2.1 Tensión.....	14
2.2.1.2.2 Perturbaciones.....	15
2.2.1.2.3 Frecuencia.....	18
2.2.1.3 Como calidad Comercial.....	19
2.2.2 Tolerancia establecida en la IEEE 519.....	19
2.3 Conceptos Generales.....	21
2.3.1 Energía Eléctrica.....	21
2.3.2 Calidad de Energía Eléctrica.....	22
2.3.3 Cargas Lineales.....	23
2.3.4 Cargas no Lineales.....	24
2.3.5 Relación entre Potencias.....	25
2.3.6 Coseno y Factor de Potencia.....	26
2.3.7 Análisis de Impedancias.....	26
2.3.8 Resonancia Armónica.....	28
2.3.8.1 Resonancia Serie.....	28
2.3.8.2 Resonancia Paralelo.....	29
2.4 Perturbaciones en Redes Eléctricas.....	31
2.4.1 Transitorios.....	31
2.4.1.1 Impulsivos.....	32
2.4.1.2 Oscilatorios.....	32
2.4.2 Interrupciones.....	33
2.4.3 Sobre Tensión de Corta Duración (Swell).....	34
2.4.4 Sobre Tensión Constante.....	34
2.4.5 Sub tensión de Corta Duración (Sags).....	35

2.4.6 Sub Tensión Constante.....	35
2.4.7 Fluctuaciones Rápidas y Bruscas de Tensión.....	36
2.4.8 Índice de Severidad de Flicker.....	37
2.5 Armónicos.....	40
2.5.1 Definición de Cantidad de Armónicos.....	41
2.5.2 Parámetros de los Armónicos.....	42
2.5.2.1 Orden.....	43
2.5.2.2 Frecuencia.....	43
2.5.2.3 Secuencia.....	43
2.5.3 Distorsión Armónica Total (THD).....	44
2.5.4 Origen de los Armónicos.....	46
2.5.5 Efecto de los Armónicos.....	48
2.5.6 Fundamento Matemático.....	48
2.5.7 Solución de los Problemas de Armónicos.....	50
2.5.8 Cancelación de Armónicos.....	50
2.6 Filtros.....	51
2.6.1 Filtros Pasivos.....	51
2.6.1.1 Filtro Sintonizado.....	52
2.6.1.2 Ecuación Para el Diseño de Filtro Sintonizado.....	55
2.6.2 Filtros Amortiguados.....	56
2.7 Tesis de Investigación similares al presente Estudio de Tesis.....	58
2.7.1 Tesis Pregrado N° 1.....	58
2.7.1 Tesis Pregrado N° 2.....	59
2.7.1 Tesis Pregrado N° 3.....	60
2.7.1 Tesis Pregrado N° 4.....	61
2.8 Estado de Arte de la Calidad de Producto frente a los Armónicos.....	62

CAPITULO 3. METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

3.1 Diseño de la investigación.....	63
3.2 Población y muestra.....	64
3.2.1 Población.....	64
3.2.2 Muestra.....	65
3.3 Técnicas de recolección de datos.....	67
3.4 Técnicas para el procesamiento y análisis de datos.....	68

CAPITULO 4.- ANÁLISIS DE LA INVESTIGACIÓN

4.1 Validación de Datos.....	71
4.2 Análisis preliminar de datos de Armónicos.....	75
4.2.1 Análisis de los Armónicos Totales (THD).....	75
4.2.2 Análisis de los Armónicos Individuales (THDv).....	77
4.3 Metodología para el diseño de filtros utilizado en este proyecto.....	86
4.4 Implementación de diseño del filtro Pasivo.....	88
4.5 Especificaciones Técnicas del Filtro Diseñado para 5to Armónico.....	91
4.6 Evaluación del barrido de frecuencia.....	94

CAPITULO 5.- EVALUACIÓN DE LOS RESULTADOS

5.1 Análisis de los resultados.....	98
5.2 Conclusiones.....	103
5.3 Trabajo Futuro.....	106
5.4 Bibliografía.....	107

ANEXOS

Anexo N° 01 Matriz de consistencia.....	109
Anexo N° 02 Norma, IEEE Std 1159-2009 (IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality).....	111
Anexo N° 03 Protocolo de Configuración del Equipo Analizador.....	112
Anexo N° 04 Diagrama unifilar, llegada al Hospital Regional.....	114

LISTADO DE TABLAS

Tabla N° 01. Indicadores de calidad de suministro.

Tabla N° 02. Valores Límites de la calidad de suministro.

Tabla N° 03. Indicadores de la calidad de producto (tensión).

Tabla N° 04. Indicadores para la medición de los armónicos y Flicker, para una empresa Suministradora.

Tabla N° 05. Límites de los armónicos de acuerdo al nivel de tensión.

Tabla N° 06. Alteraciones de corrientes en sistemas de distribución desde 120V hasta 69KV.

Tabla N° 07. Deformaciones de corrientes en sistemas de distribución desde 69KV hasta 161KV.

Tabla N° 08. Máxima distorsión de corrientes en sistemas de distribución Mayores a 161KV.

Tabla N° 09. Tensiones armónicas totales e individuales en base a su nivel de tensión.

Tabla N° 10. Representación de la calidad de la energía

Tabla N° 11. Bajo factor de potencia frente a un adecuado factor de Potencia.

Tabla N° 12. Clasificación de las interrupciones de acuerdo al rango de duración.

Tabla N° 13. Límites y valores permitidos de Flicker para una red eléctrica.

Tabla N° 14. Niveles individuales aceptables de Flicker para BT, MT, AT.

Tabla N° 15. Representación de fórmulas en función de las armónicas.

Tabla N° 16. Representación de la secuencia de los armónicos.

Tabla N° 17. Bases para la obtención de la secuencia de los armónicos.

Tabla N° 18. Representación de las principales fuentes de armónicos.

Tabla N° 19. Representación de los efectos de los armónicos.

Tabla N° 20. Representación matemática de la serie de Fourier.

Tabla N° 21. Población a considerar para el presente estudio.

Tabla N° 25. Valores de THDv Total registrados durante el periodo de prueba.

Tabla N° 26. Valores de THDi Total registrados durante el periodo de prueba.

Tabla N° 27 Valores de THDv Individuales registrados durante el periodo de prueba.

Tabla N° 28 Valores de THDi Individuales registrados durante el periodo de prueba.

Tabla N° 29 Valores de Armónicos Máximos y Mínimos en la Fase A

Tabla N° 30 Valores de Armónicos Máximos y Mínimos en la Fase B

Tabla N° 31 Valores de Armónicos Máximos y Mínimos en la Fase C

Tabla N° 32. Características para el diseño del filtro para para el 5to armónico

Tabla N° 33. Resultados de la Impedancia Armónica

LISTADO DE FIGURAS.

Figura N° 01. Representación senoidal de una carga resistiva respecto al tiempo

Figura N° 02. Representación senoidal de una carga inductiva respecto al tiempo

Figura N° 03. Representación senoidal de una carga capacitiva respecto al tiempo

Figura N° 04. Triangulo de potencias (Activa, Reactiva, Aparente, distorsionante).

Figura N° 05. Comportamiento de la resonancia armónica a una frecuencia de sintonía

Figura N° 06. Resonancia paralela conectado en el barraje A.

Figura N° 07. Transitorio impulsivo positivo de corta duración.

Figura N° 08. Transitorio oscilatorio descendente de corta duración.

Figura N° 09. Interrupción instantánea de la Tensión.

Figura N° 10. Sobre tensión de corta duración (Swell)

Figura N° 11. Sobretenión constante [pu].

Figura N° 12. Sub tensión de corta duración (Sags).

Figura N° 13. Representación de la Sub tensión [pu].

Figura N° 14. Variación de la tensión debido al efecto Flicker.

Figura N° 15. Curvas de umbrales de sensibilidad (curvas de igual severidad de parpadeo (Flicker) ante cambios de voltaje en función de la frecuencia, para sistemas de suministro en baja tensión.

Figura N° 16. Representación de Orden de las Armónicas pares e impares de tensión.

Figura N° 17. Representación de la armónica Resultante.

Figura N° 18. Tensión y corriente para una carga RC, con una tensión de ingreso senoidal.

Figura N° 19. Perfil de tensión y corriente para una carga RC, con una tensión de ingreso Armónica.

Figura N° 20 .Rectificador de 12 pulsos a partir de dos rectificadores de 6 pulsos.

Figura N° 21- Representación de los filtros Pasivos.

Figura N° 22. Filtro Sintonizado, esquema (a) y figura de comportamiento impedancia vs frecuencia (b).

Figura N° 23. Filtro Amortiguado segundo orden, esquema (a) y figura de comportamiento impedancia vs frecuencia (b).

Figura N° 24. Punto de medición con el Analizador de redes.

Figura N° 25. Diagrama de conexión del equipo analizador de redes trifásico

Figura N° 26. Figura de validación de datos de tensión Registrados por el equipo UNILYZER durante el periodo de Prueba.

Figura N° 27. Niveles de corriente promedio, registrados por el analizador UNILYZER.

Figura N° 28. Figura de validación de datos de Potencias, Registrados por el equipo UNILYZER durante el periodo de Prueba.

Figura N° 29. Validación de datos de Factor de Potencia.

Figura N° 30. Validación de datos de THD de tensión y de corriente Registrados Por el equipo UNILYZER.

Figura N° 31 Niveles de THDv Registrados en el periodo de prueba desde el 24 de Marzo al 01 de abril del 2017

Figura N° 32 Niveles THDi Registrados en el periodo de prueba desde el 24 de Marzo al 01 de abril del 2017

Figura N° 33 Armónico de tensión fase "A" de orden 5.

Figura N° 34 Armónico de tensión fase "B" de orden 5.

Figura N° 35 Armónico de tensión fase "C" de orden 5.

Figura N° 36 Fuente de tensión armónica, mediante PSCAD.

Figura N° 37. Salidas de tensión y corriente de fase.

Figura N° 38. Magnitud Armónica de tensión de la fase “A” sin Filtro.

Figura N° 39. Magnitud Armónica de tensión de la fase “B” sin Filtro.

Figura N° 40. Magnitud Armónica de tensión de la fase “C” sin Filtro.

Figura N°41 instalación de filtro Pasivo, para el Armónico de orden 5°.

Figura N° 42 Perfiles de onda de tensión y corriente después de conectar el filtro Sintonizado.

Figura N° 43. Magnitud Armónica de tensión de la fase “A” con Filtro.

Figura N° 44. Magnitud Armónica de tensión de la fase “B” con Filtro.

Figura N° 45. Magnitud Armónica de tensión de la fase “C” con Filtro.

Figura N° 46 Filtro Pasivo simple para corrientes armónicas.

Figura N° 47. Comparación de perfil de potencias Activas y Reactivas totales registrados

Figura N° 48. Perfil del factor de potencia medidos registrados por el equipo UNILYZER

Figura N° 49. Arreglo del filtro Pasivo Diseñado para el 5to armónico

Figura N° 50. Respuesta en frecuencia del filtro Diseñado.

Figura N° 51. Respuesta en frecuencia del sistema eléctrico más el filtro Diseñado.

Figura N° 52. Variación de la respuesta en frecuencia del sistema eléctrico más el filtro Diseñado.

INTRODUCCIÓN

Actualmente en nuestro país las cargas del sistema eléctrico son diseñadas para funcionar con una frecuencia de (60 Hz). Pero debido a la existencia de cargas no lineales que ocasionan, corrientes y tensiones de ondas deformantes que no son múltiplos enteros de la frecuencia (60 Hz). Producen alteraciones de la onda senoidal, que también se le puede llamar contaminación eléctrica, o también conocida como armónicos.

Los armónicos de tensiones y corrientes en el sistema eléctrico está caracterizado por las alteraciones de las ondas de tensión y corriente existentes en las redes eléctricas, ya sea en los transformadores de potencia, líneas de transmisión y los propios generadores, que básicamente está constituido por ser un múltiplo entero de la frecuencia fundamental, ocasionados en gran parte por cargas no lineales y que dañan la calidad de la energía eléctrica.

teniendo en cuenta que los inconvenientes más usuales que perjudican la calidad de la energía en los sistemas eléctricos de distribución son las deformaciones de las ondas sinusoidales ocasionado en su gran mayoría por fenómenos llamados “distorsión armónica” producto del uso masivo de cargas distorsionantes y desbalanceadas, a causa de ello se generan los efectos diversos que producen las pérdidas de las propiedades eléctricas en los materiales, y consecuentemente fallas de funcionamiento de equipos eléctricos, fallas en los equipamientos de protección y control, perdidas de aislamiento por sobre tensión,

corrientes excesivas y calentamiento de equipos primarios y producen interrupciones momentáneas en los equipos de medición y comunicación, y pérdidas económicas tanto para las empresas suministradores de energía, así como los usuarios finales.

Frente a la existencia de la mala calidad de energía se determina el grado de afectación en los equipos y la existencia de los armónicos más perjudiciales, en base a los datos obtenidos de los equipos analizadores de redes trifásicos instalados adecuadamente en un punto de conveniencia específica, para su posterior comparación con los procedimientos técnicos nacionales y principales normas de renombre internacional con referencia a calidad de energía eléctricas.

Para el desarrollo del presente estudio de tesis se sigue una metodología de análisis de acuerdo a los siguientes capítulos mencionados a continuación.

En el **capítulo 1**, se describe y se plantea el problema que ocasionan las deformaciones de tensiones y corrientes, que son la principal causa de ocasionar pérdidas materiales y económicas en dicho punto de instalación, además se especifican los objetivos a tener en cuenta en el desarrollo del presente trabajo, así como sus alcances y factibilidades, desarrollando de una manera muy especial para los fenómenos de calidad de energía, en este caso en cuanto a los armónicos en un sistemas eléctricos ya que estos también inciden directamente en un mayor control en cuanto a las normas de seguridad.

En el **capítulo 2**, del presente estudio hacemos referencia el marco teórico, donde se sigue un procedimiento ordenado para la obtención y recopilación de información importante y necesaria para un mejor entendimiento del problema existente, principalmente los armónicos de tensión y corriente, también se realiza un estudio y análisis detallado de los diferentes tipos de perturbaciones, el impacto que ocasionan y los diferentes métodos de compensación por filtrado armónico con base en la “Norma Técnica de Calidad de los Servicios Eléctricos” (NTCSE) y también se analiza los valores límites permitidos en los puntos de entrega de suministro eléctrico establecidos por las instituciones reconocidas

internacionalmente, entre ellas el “Instituto de Ingenieros Electricistas y Electrónicos” (IEEE).

En el **capítulo 3**, se menciona el método de investigación que se sigue, para el desarrollo del presente estudio de tesis, así como la identificación de la población y el criterio que se tomó para extraer la muestra y el criterio a considerar para la obtención de datos de medición del equipo analizador de redes trifásico de la marca UNILYZER 902, y las técnicas a utilizar para el procesamiento adecuado para la obtención de muestras de medición válidos.

En el **capítulo 4**, hacemos énfasis al análisis de investigación iniciando con la validación de datos, seguido con el análisis preliminar de los armónicos, además se menciona la metodología para el diseño de los filtros armónicos y finalizando con la evaluación del barrido de frecuencia.

En el **capítulo 5**, se procede a analizar y evaluar los resultados obtenidos de la medición realizada con el equipo analizador de redes trifásicos UNILYZER 902, verificando en todo momento el cumplimiento de las normas referentes a la evaluación de los armónicos, además se determinan las conclusiones de acuerdo a los objetivos que se plantearon al inicio y además se muestran los resultados obtenidos durante todo el proceso de desarrollo del presente estudio, se concluye con la mención de las referencias bibliográficas que fueron necesarias para el desarrollo del presente estudio de tesis.

CAPITULO 1:

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1 DETERMINACIÓN DEL PROBLEMA:

Como bien se sabe en los últimos años el uso de dispositivos electrónicos se ha incrementado descontroladamente a medida que va creciendo la población tanto en requerimiento de la demanda de energía y crecimiento poblacional, por lo que es necesario brindar un servicio confiable de calidad de la energía eléctrica, para seguir generando desarrollo sostenible en los habitantes.

En un complejo eléctrico bajo efectos de los armónicos de tensión y corriente, se producen varios tipos de problemas ocasionados por los mismo armónicos existentes, los elementos afectados principalmente son, aquellas cargas de usos especial en los laboratorios clínicos, centros de cómputo donde se necesita una tensión constante y senoidal, los transformadores de distribución, las líneas de transmisión. Que son ocasionadas a causa de las distorsiones armónicas inyectadas en exceso o por encima de los límites establecidos en las normativas vigentes, por parte de unos agentes conectados a las redes de distribución.

Ante esta perspectiva se tiene que reducir la inyección armónica hasta niveles por debajo de lo permitido, es decir, que sean tolerables, oportunos y aceptables para una transmisión y distribución de buena calidad de energía eléctrica. Si queremos controlar y disminuir los armónicos en la red tenemos que seguir procesos de diagnóstico como la medición

continua de los síntomas y efectos producidos por el uso de cargas deformantes de señales de tensión, para monitorizar la evolución de los armónicos, controlar y reducir al mínimo posible. Por ello, es necesario tener una idea clara de cuáles son las perturbaciones que se pueden encontrar en las redes eléctricas de baja tensión así como en las sub estaciones de distribución y cuáles son los límites permitidos de cada tipo de distorsión armónica, comenzando desde su propia generación, seguido por su transporte, y terminando en el consumidor final de energía. Teniendo en cuenta que si la inyección de armónicos a la red en un PAC (Punto de Acoplamiento Común), está dentro de los límites establecidos, no significa que en la totalidad del sistema se mantenga dentro del margen permitido, puesto que las inyecciones armónicas varía dependiendo de la topología de las cargas de cada PAC, y por lo tanto su totalidad superaría lo establecido en la (NTCSE), De este modo, tendríamos derechos a exigir las responsabilidades a nuestros suministradores de energía, pero también como usuarios tendríamos que asumir las propias en el uso adecuado de la energía que adquirimos.

En todo sistema eléctrico AC, los armónicos de corriente fluyen por la rama de un circuito que presente menor impedancia, los mismos que están divididos por la relación de impedancias de un circuito, donde normalmente las fuentes de potencia son el que presenta menor impedancia, por lo tanto la mayoría de los armónicos de corriente fluyen hacia las fuentes de potencia, sin embargo, cuando se tenga la presencia de capacitores de potencia, o banco de condensadores uno de los problemas ocasionados más comunes es cuando la reactancia capacitiva se iguala numéricamente a la reactancia inductiva equivalente del sistema, tal efecto es denominado resonancia del banco de condensadores.

Dependiendo del orden de armónicos, los efectos causados en los instrumentos de medición tanto de potencias como en los equipos de factor de potencia es prácticamente despreciable debido a que para su funcionamiento requieren discos de inducción, sin embargo, cuando existe la presencia de resonancia en el sistema a consecuencia de la

inserción de bancos de condensadores, es ahí que los instrumentos de medición son perjudicados debido a las sobretensiones producidos por los mismos bancos.

Los equipos de medición que para su funcionamiento requieren en sus componentes un disco de inducción tales como, voltímetros analógicos, medidores electromecánicos de energía trifásica y los relés de sobre corriente, solo ven circulando la corriente a la frecuencia fundamental pero, debido a existencia de cargas eléctricas desbalanceadas, y su posterior desfase de tensiones, pueden ocasionar la operación errónea de estos equipos de medición.

Cuando un transformador trifásico es alimentado con energía eléctrica, al inicio se produce un incremento de la corriente de excitación y en ocasiones esta corriente de excitación podría pasar muchas veces la corriente a plena carga, sin embargo, cuando un capacitor está en serie con el transformador, al momento de la energización ocurre una condición de resonancia que produce una elevada corriente. Este fenómeno es conocido como ferroresonancia.

1.2 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA:

Para el desarrollo del presente estudio de tesis se formulan las siguientes inquietudes a ser consultadas y su posterior desarrollo.

¿Al describir la metodología básica para la evaluación y análisis de los armónicos ocasionados en las redes de baja y media tensión, se podrá establecer un procedimiento adecuado que permita entender desde la base todo fenómeno distorsionante a consecuencia de las cargas no lineales en los sistemas de distribución de energía eléctrica?

¿Cuántos armónicos están permitidos insertar en un (PAC) por parte de los usuarios a las redes eléctricas, según la (NTCSE)?

¿Cuáles serían los métodos a considerar más adecuados para el control y eliminación de las armónicas en un punto de acoplamiento común (PAC), con base en la (NTCSE)?

¿Cuáles son las características y los criterios necesarios a tomar en cuenta, para implementar un filtro armónico para la reducción o eliminación de los armónicos de tensión existentes en un sistema eléctrico, básicamente en un punto de acoplamiento común (PAC)?

1.3 JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN.

En el presente estudio de tesis se pretende desarrollar una metodología de análisis armónico basado en la teoría y práctica teniendo en consideración los resultados obtenidos en los equipos analizadores de redes trifásicas, de donde se obtendrá las siguientes razones del estudio.

Evitar daños a equipos eléctricos y a terceras personas, actuando de manera rápida y oportuna ante fenómenos distorsionantes a la forma de onda senoidal, tomando acciones preventivas, para mejorar la calidad de la energía eléctrica.

Así mismo el presente estudio de tesis pretende servir de guía a los ingenieros que desean adquirir conocimientos en cuanto al tema de armónicos en los sistemas eléctricos, ya que desarrolla una metodología analítica, práctica y sencilla.

Disminuir las cantidades de deformaciones armónicas existentes en las redes eléctricas a consecuencia de cargas desbalanceadas y efectos de los fenómenos atmosféricos, haciendo mejoras en las redes alimentadoras dependiendo de la topología del sistema y su respectivo análisis para la factibilidad de inserción de filtros armónicos.

1.4 OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN.

1.4.1 Objetivo General:

Determinar mediante el estudio y el análisis las cantidades armónicas perjudiciales en una instalación eléctrica y plantear sus respectivos métodos de solución utilizando una computadora personal y un equipo Analizador de Redes, para el registro de datos necesarios en un determinado periodo de tiempo, para luego tomar las decisiones correctas que permitan el diseño adecuado de los Filtros Armónicos Pasivos y su respectiva configuración, con base en la (NTCSE), En especial el numeral 3.5 Referente a las perturbaciones de la calidad de producto.

1.4.2 Objetivos Específicos.

Describir la metodología básica para la evaluación y análisis de los armónicos ocasionados en las redes de baja y media tensión, a consecuencia de las cargas no lineales generadas en un PAC.

Determinar la cantidad de armónicos permitidos que un usuario en baja y media tensión puede insertar en un PAC, realizando mediciones con los equipos analizadores de redes trifásicos.

Establecer el método de solución adecuado para el control y eliminación de las armónicas, teniendo la necesidad básica de entender sus efectos secundarios que podrían ocasionar los equipos eléctricos con componentes electrónicos.

Diseñar un filtro armónico, exclusivamente del tipo pasivo, con las características necesarias para la reducción o eliminación de los armónicos de tensión existentes en un sistema eléctrico, básicamente en un PAC.

1.5 PLANTEAMIENTO DE LA HIPÓTESIS.

1.5.1 Hipótesis General.

Si procedemos a diseñar e instalar un filtro armónico en un punto de acoplamiento común, se podrá reducir o eliminar los armónicos ocasionados por las cargas desbalanceadas en un sistema eléctricas.

1.5.2 Hipótesis Específico.

Al describir la metodología básica para la evaluación y análisis de los armónicos ocasionados en las redes eléctricas de baja y media tensión, se determina exactamente la cantidad y magnitud haciendo referencia la (NTCSE).

Al evaluar las mediciones realizadas por el equipo analizador de redes trifásico UNILYZER 902 y comparando con la (NTCSE), se determina la cantidad de armónicos que un usuario puede insertar en un PAC.

Al establecer los métodos más apropiados para el control y eliminación de armónicos, se determina el tipo de sistema de filtro más preciso a ser diseñado, teniendo la necesidad básica de entender sus efectos secundarios que podrían ocasionar en los equipos eléctricos con componentes electrónicas.

Al implementar los filtros armónicos con las características necesarias para la reducción o eliminación de armónicos de tensión existentes en un sistema eléctrico, se logra la mitigación de armónicos básicamente en un punto de acoplamiento común PAC.

1.6 ALCANCES Y LIMITACIONES.

1.6.1. Alcances.

La metodología propuesta en el presente estudio de tesis tiene una aplicación general puesto que consideramos un método de análisis para diferentes configuraciones de la red en nuestro país.

1.6.2 Limitaciones.

El presente estudio de tesis sigue una metodología general y practica y pocas son sus limitaciones, ya que se pretende hacer un análisis de armónicos en los sistemas eléctricos de media tensión y baja tensión, sin importar las configuraciones de la red, sistema en malla o en anillo, sistema interconectado o aislado, incluido la ubicación geográfica de las redes, con la finalidad de dar solución a los diferentes problemas de perturbaciones armónicas.

1.7 FACTIBILIDAD.

La metodología propuesta en el presente estudio de tesis es posible y viable por los siguientes factores que consideramos.

1.7.1 Económico:

- ✓ Porque evitaremos resarcimientos por mala calidad de producto a causa de pasar los Límites de perturbaciones establecidos en la (NTCSE).
- ✓ Se evita el cambio de transformadores de distribución, malogrados por la existencia de Corrientes distorsionantes ocasionados por cargas desbalanceadas.
- ✓ Haciendo mediciones y mejoras correctivas en las Sub Estaciones de Distribución (SED), se evitará una sobrecarga del Transformador, ocasionada por exceso de Potencias Reactivas.

✓ Se evitará pérdidas de producción por ausencia de tensión ocasionados por las interrupciones momentáneas en las redes eléctricas, ya sea por sobrecalentamiento o seccionamiento de la misma.

1.7.2 Técnico:

La metodología seguida en el presente estudio de tesis es aplicada con cualquier equipo analizador de energía eléctrica estándar homologado por el OSINERGMIN, donde cada equipo registra parámetros continuos útiles para realizar el análisis de armónicos de tensión y de corriente, dependiendo de la configuración aplicada al equipo y la topología de las redes eléctricas.

1.7.3 Operativo:

Es necesario contar con un técnico electricista altamente capacitado, para las respectivas instalaciones y desinstalaciones de los equipos analizadores de redes y un supervisor a cargo de la seguridad, respetando las Normas de seguridad en Subestaciones de Distribución y Transformadores de MT/BT y un Ingeniero para realizar el análisis de los resultados conseguidos de los equipos analizadores de redes y su respectivo planteamiento de solución.

CAPITULO 2

MARCO TEÓRICO.

2.1 ANTECEDENTES

Antecedentes Históricos. Los Armónicos no son un fenómeno nuevo, de hecho, un texto publicado por el Ing. Charles Proteus Steinmetz en 1916 le presta mucha importancia a los Armónicos en los Sistemas trifásicos de Potencia, en especial a los de tercera orden generados en los Transformadores de Potencia a causa de la saturación del hierro, de hecho fue el Ing. Charles Proteus Steinmetz la primera persona en plantear como método de solución ante los armónicos de tercer orden, la realización de las conexiones en delta en el lado secundario del transformador para desviar las corrientes armónicas. [1]

Luego de aquel planteamiento propuesto por Steinmetz se realizaron importantes mejoras en cuanto al diseño de transformadores y motores de inducción, los mismos que ayudarían a reducir ampliamente los problemas de armónicos, en especial los de orden tercera, luego con la llegada de la electrificación rural masiva y la implementación de las redes de telefonía y su posterior generación de armónicos de corrientes, fueron necesarias los diseños de filtros pasivos para la mitigación de armónicos.

En los últimos años se ha considerado como una necesidad el hacer esfuerzos considerables para reducir las distorsiones armónicas en las redes eléctricas, además se ha establecido Normas, procedimientos y recomendaciones para su control, se fabricaron

equipos modernos y se desarrollaron Softwares sofisticados que permita tener una visión más clara y precisa de los parámetros eléctricos que deforman las formas de ondas. El área de calidad de Energía Eléctrica estudia los armónicos en las redes eléctricas y plantea métodos de solución adecuados para reducir al mínimo posible las distorsiones armónicas, hoy en día el análisis transitorio de los sistemas eléctricos de distribución se realiza generalmente utilizando una computadora y un software adecuado.

En el Perú después de que se iniciara la privatización de las empresas del sector electricidad, en el año 1990, con el objetivo de la liberalización del mercado, el Osinergmin asume como organismo competente para regular el sector eléctrico, y con el objetivo de asegurar que los consumidores finales puedan disponer de energía confiable y de buena calidad, fue aprobada la (NTCSE), que en su numeral 3.5 Calidad de Producto establece como parámetros necesarios que se debe garantizar la Tensión, la Frecuencia y las Perturbaciones, donde se fijan las tolerancias mínimas de Calidad.

Desde su aprobación de la (NTCSE), en el año 1997 ha pasado por tres etapas y sufrido algunos cambios así paso por una 1ra etapa de adecuación y sin considerar ninguna penalidad, con una duración de 1 año y 6 meses, la 2da etapa con una duración de 1 año y 6 meses considerando unas penalidades mínimas, y la 3ra etapa con una duración indefinida, estableciendo penalidades mayores de compensación aproximadamente 11 veces mayor que la 2da etapa. Esto con la finalidad de obligar a las empresas suministradoras de subsanar los inconvenientes presentados en las etapas anteriores. Las compensaciones o resarcimientos son una retribución al consumidor por mala calidad de energía que le haya sido suministrado. [1]

2.2 ASPECTOS NORMATIVOS.

En la actualidad nuestro país está regida por una norma (NTCSE), que indica las tolerancias mínimas básicas requerida para considerar un servicio eléctrico de buena calidad. Existen también normas internacionales como la IEEE 1159: 1992, donde establecen tolerancias mínimas con respecto a la calidad de producto, específicamente los armónicos de tensión y corriente que se deben cumplir en un PAC. De acuerdo al crecimiento de la población y el incremento de la demanda de energía, la sociedad se está volviendo cada vez más dependiente del suministro eléctrico, por lo que necesita y exige una mayor calidad del mismo. En nuestro país para tener un mayor control con respecto a la calidad del servicio eléctrico, detallamos a continuación:

2.2.1 Norma Técnica de Calidad de los Servicios Eléctricos (NTCSE)

En nuestro país con el objetivo de asegurar a los usuarios de contar con una energía eléctrica de buena calidad, se elabora la (NTCSE), La cual fue aprobada por Decreto Supremo D.S. Nº 020-97-EM el 09-10-1997, y publicado el 11/10/1997. En la presente Normativa Peruana se plantean y establecen los métodos de medición de la energía en los puntos indicados por la entidad supervisora, tanto como sus tolerancias máximas limitadas a los usuarios en cuanto a la inyección de señales deformantes, además se indican los métodos de compensación o resarcimiento por mala calidad de la Energía ya sea por el uso inadecuado de la energía o el excesivo uso de cargas no lineales.

La Normatividad Peruana evalúa en cuanto a la calidad de energía los parámetros de Calidad de Producto, Calidad de Suministro, y la Calidad de Servicio Comercial exclusivamente, todos estos parámetros son medidos en el punto de entrega al usuario final. [2]

2.2.1.1 Como Calidad del Suministro. Este parámetro está relacionado principalmente con los aspectos técnicos del suministro continuo de electricidad, desde el punto de vista de la supervisión a las empresas distribuidoras cumple ciertos requisitos los que se detalla en la siguiente tabla. [2]

Indicadores de Calidad de Suministro	
Periodo de Control	Medición semestral
Indicadores de calidad	<ul style="list-style-type: none"> - Cantidad de interrupciones por cliente(N) - Tiempo total ponderado de interrupciones por cliente (D). además se evalúa de manera independiente las interrupciones por rechazo de carga
Control	Por suministro
Tolerancias	Límites N y D según nivel de tensión del suministro: <ul style="list-style-type: none"> - MAT/AT: N = 2, D = 4 h. - MT: N = 4, D = 7 h. - BT: N = 6, D = 10 h. Sector distribución Típico 2 y 3: 30% adicional para el caso de rechazo de carga no existe tolerancia.
Compensación	$[e \cdot E \cdot ENS]$ <ul style="list-style-type: none"> - e: 0.035 US\$/kWh en III etapa. - E: factor según rango de transgresión de N y D. - ENS: energía teórica no suministrada al cliente
Exoneraciones	No se considera los cortes menores que 3 minutos, las consideradas como de fuerza mayor, las asociadas a obras de gran envergadura de interés público de otros sectores, por reforzamiento de instalaciones de transmisión, por congestión en transmisión o por falta de abastecimiento en el ducto de gas natural.

Tabla N° 01- Indicadores de la calidad de suministro.

Fuente: ("<http://www.osinergmin.gob.pe/empresas/electricidad/calidad>")

Valores Límite de la Calidad del suministro.

Sector Típico	Valores límites	Indicadores	Tolerancia
2	Por usuarios afectados (NTCSE)	N: N° de interrupción por usuario y por semestres	8 /sem.
		D: tiempo de las interrupciones por usuario y por semestres	13 horas/sem.
	Por sistema eléctrico	SAIFI: Frecuencia promedio de las interrupciones por usuarios del sistema eléctrico	5 /año
		SAIDI: Duración promedio de las interrupciones por usuarios del sistema eléctrico	9 horas/año
3	Por usuario afectado (NTCSE)	N: N° de interrupciones por usuario y por semestre	8 /sem.
		D: Duración ponderada de las interrupciones por usuario y por semestre	13 horas/sem
	Por sistema eléctrico	SAIFI: Frecuencia promedio de las interrupciones por usuarios del sistema eléctrico	7/año
		SAIDI: Duración promedio de las interrupciones por usuarios del sistema eléctrico	12 horas/año
4,5 y SER	Por usuario afectado (NTCSER)	NIC: N° de interrupciones promedio por cliente y por semestre	10 /sem.
		DIC: Duración ponderada acumulada de interrupciones promedio por cliente por semestre	25 y 40 horas/sem
	Por sistema eléctrico	SAIFI: Frecuencia promedio de las interrupciones por usuarios del sistema eléctrico	12 y 24/ año
		SAIDI: Duración promedio de las interrupciones por usuarios del sistema eléctrico	16 y 40 horas/año

Tabla N° 02- Valores Límites de la calidad de suministro.

Fuente: (<http://www.osinergmin.gob.pe/empresas/electricidad/calidad>) / [3]

2.2.1.2 Como Calidad de Producto. La calidad de producto propiamente dicha evalúa el resultado de una fuente de energía útil y necesaria para el funcionamiento de los equipos de uso general. Como medidas de control bajo este concepto se evalúan la tensión, la frecuencia, y las perturbaciones eléctricas como son los armónicos y el Flicker. [3]

2.2.1.2.1 Tensión. Para evaluar la tensión se realiza una medición en intervalo de 15 minutos de duración y un periodo de 7 días calendarios y está relacionado por la diferencia de los valores eficaces RMS instantáneos medidos en el punto de conexión común y el valor de la tensión nominal del sistema.

$$\Delta V_K(\%) = \frac{V_K - V_N}{V_N} * 100\%$$

Las tolerancias admitidas de acuerdo a las normativas vigentes a nivel nacional es de $\pm 5.0\%$ de la tensión nominal en los puntos de conexión común. Con referencia a las redes secundarias en las zonas calificadas como Urbano-Rurales y/o Rurales dichas tolerancias tiene un límite de $\pm 7.5\%$.

Además se tiene en cuenta que la energía suministrada es considerada de mala calidad, cuando los valores de la tensión se encuentra fuera del rango de los límites establecidas en la Normativa Nacional vigente, por un tiempo superior al 5% del período de medición tal cual lo establece la (NTCSE). [3]

Periodos de Control	Mensual
Periodos de Medición	7 días
Indicador de Calidad	Variación porcentual de la tensión en intervalos de 15 minutos
Control	1 de cada 12 puntos de entrega en MT, AT MAT 1 de cada 3000 de entrega en BT
Tolerancias	$\pm 5\%$ de la tensión nominal o de tensión de operación y hasta 5% del tiempo del periodo de medición
Compensación	$\sum[a*Ap*E(p)]$ a : 0.05US\$/kWhe Ap. : factor de proporcionalidad según rango de transgresión E(p) : energía suministrada fuera de tolerancia en intervalo p

Tabla N° 03- Indicadores de la calidad de producto (tensión).

Fuente: Resolución OSINERGMIN N° 616-2008-OS-CD [3]

2.2.1.2.2 Perturbaciones.

Debido al incremento de las cargas eléctricas y la fabricación de aparatos eléctricos muy sensibles a las variaciones de tensión, es necesario tener un sistema eléctrico que sea constante e interrumpible y sobre todo que sea confiable el mayor tiempo posible, para lograr dicho requisito es necesario la utilización de equipos cuyos componentes en la gran mayoría hacen uso de la electrónica de potencia, los mismos que para su funcionamiento hacen que se distorsionen las señales de tensión y corriente aguas arriba del equipo que alimentan, ocasionando deformaciones de la tensión en un sistema eléctrico. [4]

Flicker.- Conocido como, Índice de Severidad por Flicker (Pst), para ser considerada de buena calidad, debe ser menor que la unidad $Pst \leq 1$, tanto como en Baja, Media y Alta Tensión. Se considera el límite igual a la unidad $Pst = 1$, como el límite de sensibilidad visual relacionada con los lúmenes emitidos por las luminarias y que es la fluctuación máxima de luminancia que puede ser soportada por el ojo Humano sin presentar molestia.

Armónicos.- Se denomina Armónicos a los fenómenos perjudiciales ocasionados en los sistemas eléctricos y producidos a consecuencia de la utilización de los Equipos Eléctricos donde están compuestos principalmente por elementos de la Electrónica de Potencia, para nuestro Sistema Eléctrico es considerado de Mala Calidad cuando los valores de los Armónicos de tensión totales THDv superan el 8% en un sistema de baja tensión, sin embargo, tratándose en sistemas de Alta Tensión los valores totales de Distorsión Armónica total no superan el 3% como límite máximo, tal cual se establece en la (NTCSE), donde para el estudio y control de armónicos se consideran desde el orden dos 2° hasta el orden cuarenta 40°.

Control.- Con respecto a esta parte de la Norma, indica que el control de los Armónicos en un Sistema Eléctrico se realiza mediante mediciones continuas de 7 días calendario con intervalos de 10 minutos para cada medición, realizados con equipos analizadores debidamente homologados por la entidad supervisora (OSINERGMIN). Las muestras registradas para ser considerados validas deben garantizar las siguientes especificaciones:

- ✓ Realizar una medición por cada 50 Suministros existentes brindados por la concesionaria comercializadora ya sea en Media Tensión, Alta Tensión y muy Alta Tensión
- ✓ Realizar una medición representativa de acuerdo a la cantidad de clientes existentes en las subestaciones de MT/BT de acuerdo a la siguiente tabla que se indica en la Normativa Peruana.

Clientes en Baja Tensión por Suministrador	Número de Puntos de Medida Registrados Mensualmente	
	Flicker	Armónicos
Con más de 500,000 clientes	18	18
Con 100,001 a 500,000 clientes	9	9
Con 10,001 a 100,000 clientes	5	5
Con 501 a 10,000 clientes	2	2
Con 500 clientes o menos	-	-

Tabla N° 04- Indicadores para la medición de los armónicos y Flicker, para una empresa suministradora.
Fuente: Base metodológica de la NTCSE [3]

En el siguiente cuadro se muestran las tolerancias máximas de armónicos totales e individuales que debe cumplir un sistema eléctrico para ser considerado de buena calidad.

ORDEN (n) DE LA ARMÓNICA ó THD	TOLERANCIA Vi' ó THD' (% con respecto a la Tensión Nominal del punto de medición)	
	Alta y Muy Alta Tensión	Media y Baja Tensión
(Armónicos Impares no múltiplos de 3)		
5	2.0	6.0
7	2.0	5.0
11	1.5	3.5
13	1.5	3.0
17	1.0	2.0
19	1.0	1.5
23	0.7	1.5
25	0.7	1.5
Mayores de 25	0.1 + 2.5/n	0.2 + 12.5/n
(Armónicos impares múltiplos de 3)		
3	1.5	5.0
9	1.0	1.5
15	0.3	0.3
21	0.2	0.2
Mayores de 21	0.2	0.2
(Armónicos Pares)		
2	1.5	2.0
4	1.0	1.0
6	0.5	0.5
8	0.2	0.5
10	0.2	0.5
12	0.2	0.2
Mayores de 12	0.2	0.2
THD	3	8

Tabla N° 05- Tolerancia máxima de los límites de los armónicos de acuerdo al nivel de tensión
Fuente. Norma Técnica de Calidad de los Servicios Eléctricos [NTCSE] [2]

$$THDv = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{n=40} (V_h)^2}}{V_1} * 100(\%) \dots \dots (2.1)$$

De acuerdo al cuadro anterior podemos apreciar que los niveles que establece la Normativa Peruana son valores tolerables y controlables con respecto a otras Normas internacionales, sin embargo, estos valores quedan muy cortos a falta de conocimientos técnicos donde los clientes al momento de utilizar sus Equipos Eléctricos están inyectando Armónicos indirectamente a la red sin darse cuenta superando ampliamente los valores estipulados en la presente Normativa Peruana.

2.2.1.2.3 Frecuencia.

Para realizar la evaluación de la frecuencia de entrega en un Sistema Eléctrico, se requiere medir en un intervalo de quince (15) minutos por un periodo indeterminado, la variación de la frecuencia (Δf_k) se mide como la relación que existe entre la medida (f_k) en un punto de conexión común del sistema eléctrico, y la medida de la Frecuencia Nominal (f_N) del mismo sistema eléctrico, el cual está representado de la siguiente manera.

$$\Delta f_k(\%) = \frac{f_k - f_N}{f_N} * 100\% \quad (2.2)$$

Muy aparte de la frecuencia instantánea medida, existen otros dos indicadores denominados variaciones Súbitas de Frecuencia -VSF controlados por un intervalo de un minuto y la Integral de variaciones diarias de Frecuencia (IVDF).

$$VSF = \sqrt{\left[\left(\frac{1}{1\text{minuto}}\right) \int_0^{1\text{minuto}} f_n^2(t) dt\right]} \quad F_n: (\text{expresada en Hz}) \dots \dots (2.3)$$

$$IVDF = \partial + \int_0^{24\text{Hrs}} [f(t) - f_n] dt; \quad (\text{expresada en ciclos}) \dots (2.4)$$

Dónde: ∂ , viene a ser la sumatoria algebraica de los términos de la función integral que aparecen como segundo término en el miembro derecho de la formula (2.4), Las tolerancias establecidas para variaciones sobre la frecuencia nominal, en todo nivel de tensión son;

- Variación sostenida ($\Delta f_k'$) (%) : $\pm 0.6\%$
- Variación Súbita (VSF') : $\pm 1.0\text{Hz}$.

2.2.1.3 Como Calidad Comercial. Este aspecto no está relacionado directamente con el suministro continuo de electricidad, sino que hace referencia a la sociedad en general, existe una mayor exigencia sobre la calidad de atención comercial. Como son los el trato al Cliente, las obligaciones de la suministradora para con sus Clientes en cuanto a la información sobre su suministro, los medios de comunicación y lo avisos programados sobre algún corte del servicio eléctrico. [4]

2.2.2 Tolerancias Establecidas en la IEEE 519-1992

Ésta Norma tiene como característica principal de establecer mediante recomendaciones prácticas los límites máximos de los armónicos de tensión y corriente mediante las siguientes tablas.

✓. Para la primera parte de esta tabla nos muestran los límites máximos recomendados para la corriente armónica donde cualquier carga eléctrica no lineal está conectado a un punto de conexión denominado, PAC. Los límites establecidos en la presente normativa esta relacionados directamente con la corriente de corto circuito en dicho punto de medición y la corriente de máxima demanda generada por el usuario. Los limites expresados en la tabla de distorsión de corriente están divididos en dos tipos: un límite de distorsión armónica individual de acuerdo al rango de frecuencia y una distorsión armónica total (THD), para poder realizar el cálculo matemático se considera que los límites máximos de corriente armónica dependen exclusivamente de la rigidez en la barra AC en un PAC, esta rigidez está relacionada con la razón de corto circuito (SCR), la cual se representa como la división entre la corriente de cortocircuito en la barra AC, y la corriente medida en dicho punto de conexión. [5]

$$SCR = \frac{I_{SC}}{I^1} \dots \dots (2.5)$$

Donde la distorsión armónica de corriente THDi en el PAC son considerados bajos debido a las barras débiles (SCR pequeño), ya que el impacto de los armónicos de corriente en tales barras vienen a ser muy elevados.

En las barras consideradas rígidas la SCR es alto y el impacto armónico de tensión ocasionado por la carga en la barra vendría a ser bajo, de ahí que se deduce lo siguiente, en una barra que presenta gran SCR, los límites de distorsión armónicas de tensión son mayores.

DISTORSIÓN MÁXIMA DE CORRIENTE ARMÓNICO						
$\frac{I_{SC}}{I^1}$	Orden de las armónicas individuales					Distorsión Armónica Total %
	<11	11<=h<17	17<=h<23	23<=h<35	>=35	
<20	4.0	2.0	1.5	0.6	0.3	5.0
20<50	7.0	3.5	2.5	1.0	0.5	8.0
50<100	10.0	4.5	4.0	1.5	0.7	12.0
100<1000	12.0	5.5	5.0	2.0	1.0	15.0
>1000	15.0	7.0	6.0	2.5	1.4	20.0

Tabla N° 06- Máxima distorsión de corriente en sistemas de distribución desde 120V hasta 69KV.

Fuente. Recomendaciones prácticas para el control de armónicos IEEE 519-1992. Tabla 10.3 [5]

DISTORSIÓN MÁXIMA DE CORRIENTE ARMÓNICO						
$\frac{I_{SC}}{I^1}$	Orden de las armónicas individuales					Distorsión Armónica Total %
	<11	11<=h<17	17<=h<23	23<=h<35	>=35	
<20	2.0	1.0	0.75	0.3	0.15	2.5
20<50	3.5	1.75	1.25	0.7	0.25	4.0
50<100	5.0	2.25	2.0	0.75	0.35	6.0
100<1000	6.0	2.75	2.5	1.0	0.5	7.5
>1000	7.5	3.5	3.0	1.25	0.7	10.0

Tabla N° 07- Máxima distorsión de corriente en sistemas de distribución desde 69KV hasta 161KV.

Fuente. Recomendaciones prácticas para el control de armónicos IEEE 519-1992. Tabla 10.4 [5]

DISTORSIÓN MÁXIMA DE CORRIENTE ARMÓNICO						
$\frac{I_{SC}}{I^1}$	Orden de las armónicas individuales					Distorsión Armónica Total %
	<11	11<=h<17	17<=h<23	23<=h<35	>=35	
<50	2.0	1.0	0.75	0.3	0.15	2.5
>=50	3.0	1.5	1.15	0.45	0.22	3.75

Tabla N° 08- Máxima distorsión de corriente en sistemas de distribución Mayores a 161KV.

Fuente. Recomendaciones prácticas para el control de armónicos IEEE 519-1992. Tabla 10.5 [5]

✓. En la segunda recomendación principal de la norma IEEE 519-1992, pone límites para las distorsiones armónicas de voltaje en las barras de un PAC, ésta tabla N° 09 nos muestra los límites recomendados en las distorsiones de voltajes armónicos para cada uno de los

armónico individuales y los límites en la distorsión armónica total. La tabla siguiente está dividida en rangos de distintos voltajes de comercialización, una sugerencia adicional que se realiza en el documento IEEE 519-1992, es que en los sistemas eléctricos de alto voltaje de corriente continua DC pueden tener un máximo de 2% de distorsión armónica total THD, en los terminales HVDC, si es que la red DC puede atenuar los armónicos prioritariamente o alcanzar una barra de carga, la siguiente tabla muestra las recomendaciones prácticas establecidas en la IEEE 519-1992 para el control de armónicos en un sistema eléctrico AC. [5]

Nivel de tensión	(2.3 – 68.9)KV	(69 – 138)KV	>138KV
Valor para Armónicos Individuales	3.0	1.5	1.0
Distorsión Armónica total	5.0	2.5	1.5

Tabla N° 09- Valores máximos de las tensiones armónicas totales e individuales en base a su nivel de tensión.

Fuente. Recomendaciones prácticas para el control de armónicos IEEE 519-1992 Tabla 11.1 [5]

2.3 CONCEPTOS GENERALES:

2.3.1 Energía Eléctrica. Se denomina energía eléctrica al producto o bien de consumo en nuestras vidas que presenta aspectos especiales e importantes, que se generan en mayor parte alejados de los centros de consumo para luego ser transportados mediante las redes eléctricas de distribución, pasando a través de varios transformadores llegando a los consumidores o clientes finales, desde su generación hasta el centro de consumo, tiene cuatro magnitudes elementales que lo caracterizan a la onda de tensión eléctrica y nos permite medir su grado de pureza mediante los siguiente parámetros eléctricos.

- ✓ Frecuencia
- ✓ Simetría
- ✓ Amplitud
- ✓ Forma de Onda

2.3.2 Calidad de Energía Eléctrica. Hoy en día hablar de Calidad de Energía Eléctrica es de gran importancia en el sector eléctrico para las empresas de Generación, Transmisión, Distribución, los clientes libres y residenciales, la calidad de la energía está relacionada con el cumplimiento de requisitos en la forma y amplitud de la señal de tensión y corriente. El marco normativo en nuestro País está dada por la Norma Técnica de Calidad de los Servicios Eléctricos (NTCSE), dicha norma establece los requisitos mínimos que debe tener la onda de tensión, por lo tanto la energía consumida. Así mismo establece parámetros a las empresas concesionarias de cómo se debe realizar el control de la calidad.

Como Calidad de Producto	Como Suministro	Como Servicio Comercial
Mide la magnitud de voltaje constante	Controla la frecuencia de interrupciones	Tarifas claras y sin errores
Desviación de frecuencia (problemas desde la generación)	Duración de interrupciones	Minimizar e informar cortes de energía
Deformaciones de onda (perturbaciones eléctricas)	Número de interrupciones	Reposición oportuna de energía

Tabla N° 10- representación de la calidad de la energía
Fuente. Elaboración propia en base a la NTCSE

Según la IEEE 1100. Define calidad de energía a aquel sistema eléctrico que está operando a una tensión de línea constante, bajo ciertos requisitos de compatibilidad electrónica, es decir las características que se tiene en un punto tal, garantice el correcto funcionamiento de las cargas que van a ser utilizados en dicho punto, y deja de ser de calidad cuando existe un riesgo de daño ya sea por excesiva tensión o insuficiente niveles de voltaje medidos en un Sistema Eléctrico.

Según la IEC 6100. Define calidad de energía como la evaluación en cierto punto del sistema (PAC) con referencia a ciertos parámetros ya sea del sistema o de una carga específica.

2.3.3 Cargas Lineales. También conocida como “linear time invariant loads” Las cargas lineales en términos sencillo se definen como aquella carga eléctrica donde al aplicárseles una tensión senoidal, resulta en una corriente senoidal también, que a su vez están compuestos por Cargas Resistivas, Cargas Inductivas puras, Cargas Capacitivas Puras.

Carga Resistiva. Convierte la energía eléctrica suministrada a un equipo en energía calorífica, cuyos principales componentes son las estufas, y todo aquellos equipos que disipen energía en forma de calor, además se puede indicar que a tensión suministrada no necesariamente se distorsiona, pero si puede bajar o subir de amplitud dependiendo de la demanda que se le dé al equipo, además siempre se encuentran en fase con la corriente que genera la carga eléctrica.

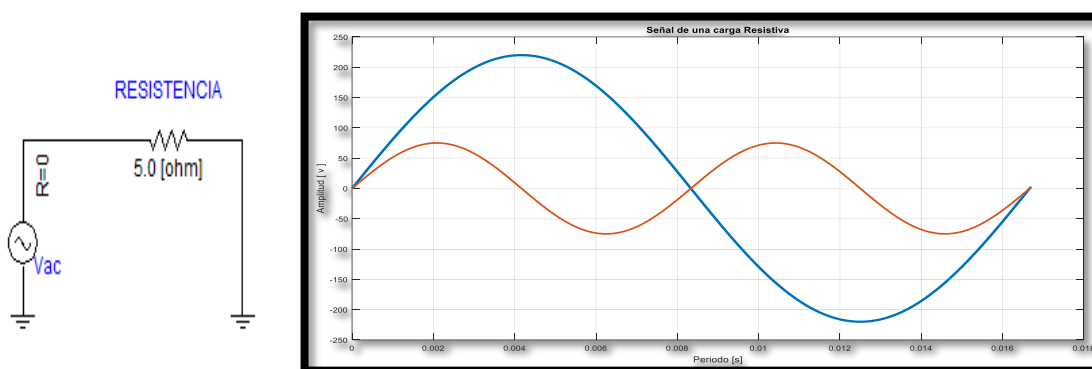


Figura N° 01- Representación senoidal de una carga resistiva respecto al tiempo
Fuente. Elaboración propia en base a Matlab 2015Ra

Carga Inductiva. En el caso de una carga inductiva, lo que ocurre es un desplazamiento de la tensión con respecto a la corriente en 90° , pero no existe cambios en los desfases de la onda de tensión. Cuyos principales componentes son aquellas cargas que solo tienen una bobina en sus componentes interiores, así como los motores de inducción y las lámparas incandescentes, pero si existe una desplazamiento debido a la carga eléctrica consumida durante su funcionamiento.

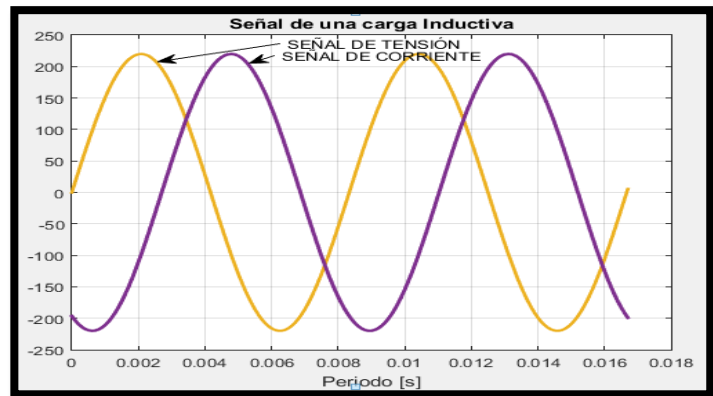
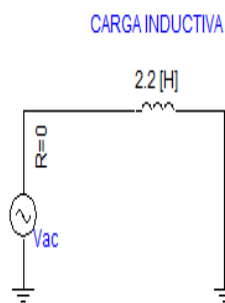


Figura N° 02- Representación senoidal de una carga inductiva respecto al tiempo.
Fuente. Elaboración propia en base a Matlab 2015Ra.

Carga Capacitiva. Las cargas capacitivas puras son aquellas donde la señal sinusoidal de la corriente adelanta en 90° a la señal de la tensión, cuyas principales cargas son los capacitores.

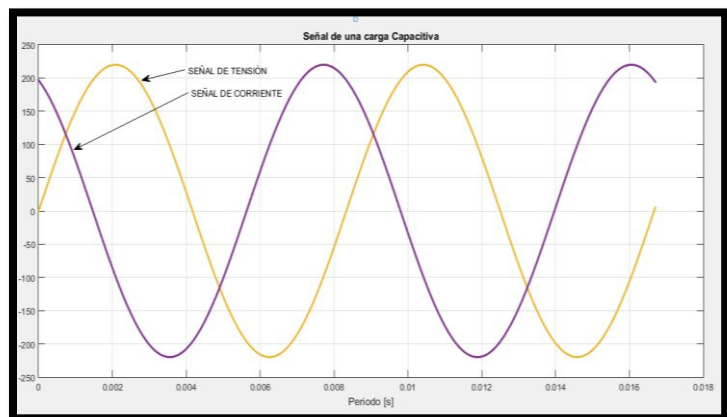
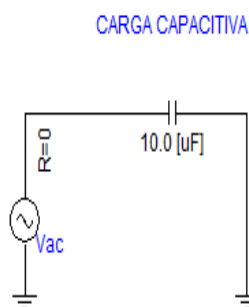


Figura N° 03- Representación senoidal de una carga capacitiva respecto al tiempo
Fuente. Elaboración propia en base a Matlab 2015Ra

2.3.4 Cargas no Lineales.

Está definida como, si el resultado de la aplicación de una tensión sinusoidal a una carga, no resulta en una corriente sinusoidal, estas cargas no presentan una impedancia constante durante el ciclo completo de la aplicación de la tensión. Entre las cuales se pueden encontrar los equipos de cómputo, los convertidores de tensión, los variadores de frecuencia, los hornos de arco eléctrico, etc.

2.3.5 Relación entre las Potencias.

Magnitud	Unidad	Calculo
Potencia Activa (P) Se define como la capacidad que tiene la energía de producir trabajo en un periodo de tiempo, también denominada como potencia útil.	W	$P = VI * \cos(\phi)$ $P = R * I^2 = \frac{V^2}{R}$
Potencia Reactiva (Q) La potencia reactiva es aquella potencia necesaria para poder generar campos magnéticos en los arrollamientos de los motores de inducción, pero que no son aprovechables para generar trabajo efectivo.	Var	$Q = VI * \sin(\phi)$ $Q = X * I^2 = \frac{V^2}{X}$
Potencia Aparente (S) Se le denomina potencia aparente a la capacidad consumida por una carga eléctrica y es el producto de los valores eficaces de la tensión y corriente, matemáticamente se obtiene como la suma vectorial de las potencias activas y reactivas totales de las cargas en una red eléctrica	VA	$S_1 = VI$ $S_1 = \sqrt{P^2 + Q^2}$
Potencia distorsionante (D) Es aquella potencia generada por la existencia de armónicos en las redes eléctricas, en otras palabras es la potencia real de una instalación.		$D^2 = V_1^2 (I_1^2 + I_2^2 + \dots + I_N^2)$ <p>Dónde: I = Corriente armónica</p> $S = \sqrt{P^2 + Q^2 + D^2}$

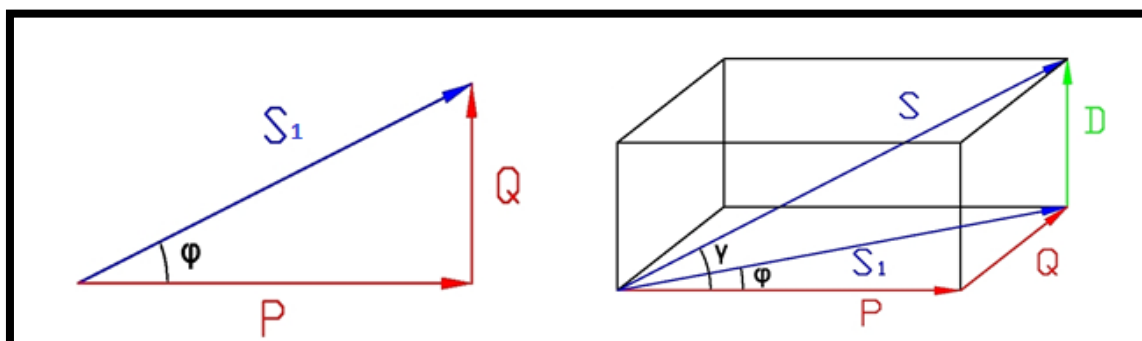


Figura N° 04- representación de triángulo de potencias (Activa, Reactiva, Aparente, Distorsionante).
Fuente. Elaboración propia.

2.3.6 Cos (φ). Y Factor De Potencia (Fdp).

Cos (φ). Se define como aquella relación de la Potencia Activa (P) y la potencia Aparente (S), esta se puede expresar de la siguiente manera.

$$\cos(\phi) = \frac{P}{S} = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2}} \quad \dots (2.6)$$

Factor de Potencia (Fdp). Este término es frecuentemente confundido con el coseno de pi, sin embargo, la definición correcta nos indica que el factor de potencia es aquella relación que implica la participación de potencias activas (P) y aparentes (Q), bajo los efectos de los armónicos distorsionantes generados en dicho punto de medición, matemáticamente se puede representar de la siguiente manera.

$$Fdp = \frac{P}{S} = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2 + D^2}} \quad \dots (2.7)$$

Dicho esto se puede mencionar algunas características para considerar un adecuado factor de Potencia.

Bajo factor de Potencia	Adecuado Factor de Potencia
<ul style="list-style-type: none"> ✓ Mayor carga del sistema ✓ Mayores corrientes ✓ Mayores perdidas ✓ Mayor calentamiento ✓ Intervención de fusibles e interruptores ✓ Posibles sobrecargas de (transformadores y cables) necesidad de nuevos equipos en las subestaciones ✓ penalidades 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Mayor carga activa disponible ✓ Menores corrientes ✓ Menores perdidas ✓ Menor calentamiento ✓ Mayor disponibilidad de equipos ✓ Sin sobrecargas de Transformadores y cables ✓ No necesitan de nuevos equipos y no penalidades

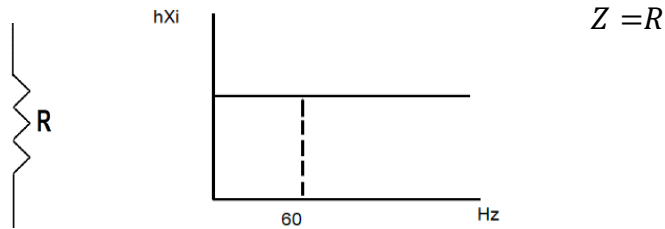
Tabla N° 11- Características de un bajo factor de potencia frente a un adecuado factor de potencia.

Fuente. Elaboración propia.

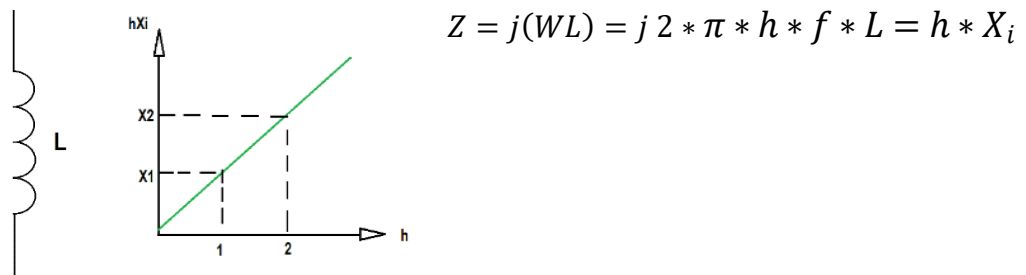
2.3.7 Análisis de Impedancias. En un sistema eléctrico en general la representación de las impedancias está compuesta por los elementos activos y pasivos de una instalación ya sea las resistencias, las bobinas en los quipos y los condensadores en sí, el cual se relaciona de esta forma.

$$V_h = I_h * Z_h$$

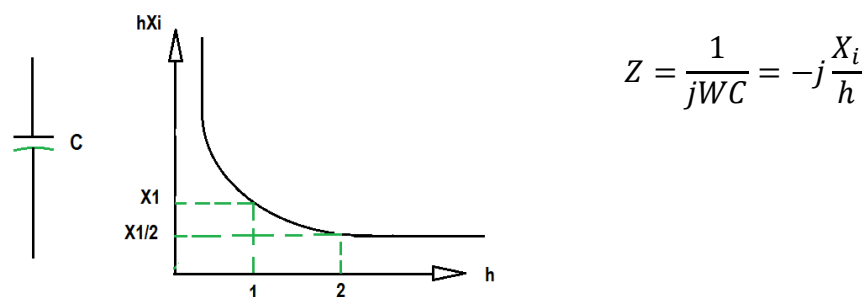
Resistencia (R). Para el caso de la resistencia, su impedancia es la misma ($R=Z$) y su comportamiento no varía con el tiempo, su Figura es una línea horizontal tiene la misma amplitud al aumentar la frecuencia.



Bobinas (L). Para el caso de las bobinas, ésta si representa algunas variaciones respecto a la resistencia. La aplicación más utilizada es en el arrollamiento de los transformadores, de los motores y para el uso de reactores.



Condensadores (C). Para el caso de los condensadores se cumple que su impedancia es inversamente proporcional al orden de los armónicos, esto hace que para elevadas frecuencias de corto circuito presenten menor resistencia y por lo tanto una mayor corriente. La aplicación más utilizada es en el banco de condensadores.



2.3.8 Resonancia Armónica.

El uso de reactores y capacitores para compensación de factor de potencia en un sistema eléctrico podría originar resonancias en el momento de su funcionamiento, los mismos que podrán ocasionar corrientes y tensiones excesivas que perjudiquen los equipos del sistema. [6]

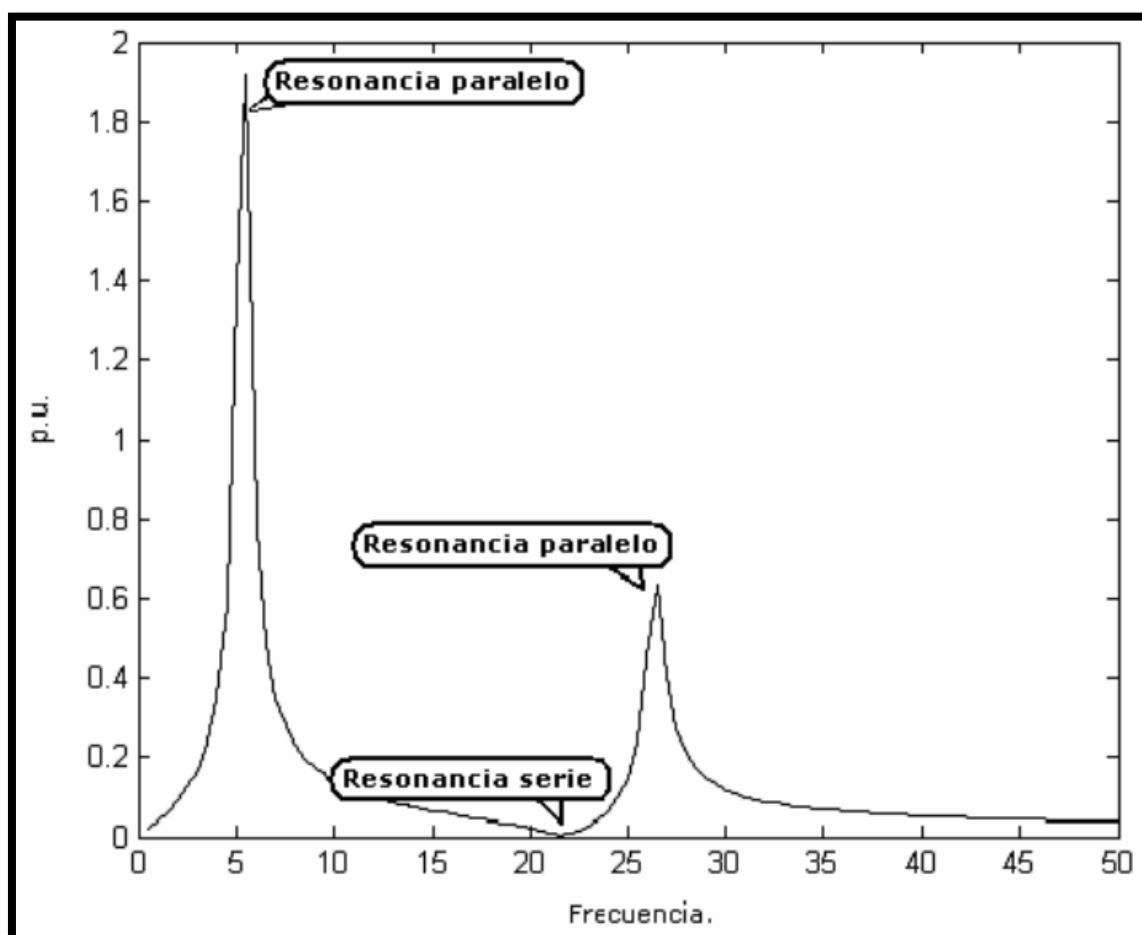


Figura N° 05. Perfil del comportamiento de la resonancia armónica a una frecuencia de sintonía.

Fuente: DE LA ROSA, Francisco C, (2006) [6]

2.3.8.1 Resonancia Serie.

Identificamos una resonancia en serie cuando en el sistema se aprecia una impedancia muy baja, y la frecuencia del sistema se iguala a la resonancia del sistema. Por lo tanto, cuando existen pequeños armónicos de tensión en el sistema, ocasionan grandes armónicas de corrientes que ocasionan daños a los equipos eléctricos, Los filtros

diseñados para las resonancia en serie tienen por función introducir resonancias series en un punto de conexión del sistema.

2.3.8.2 Resonancia Paralelo.

La resonancia paralela es denominada a, aquella impedancia que tiende a incrementarse que a su vez elevan los valores de las voltajes y corrientes armónicas en el punto de conexión, este fenómeno es ocasionado principalmente por que en dicho punto de conexión existe un banco de condensadores y una fuente generadora de armónicos funcionando al mismo tiempo, tal como se indica en la siguiente Figura:

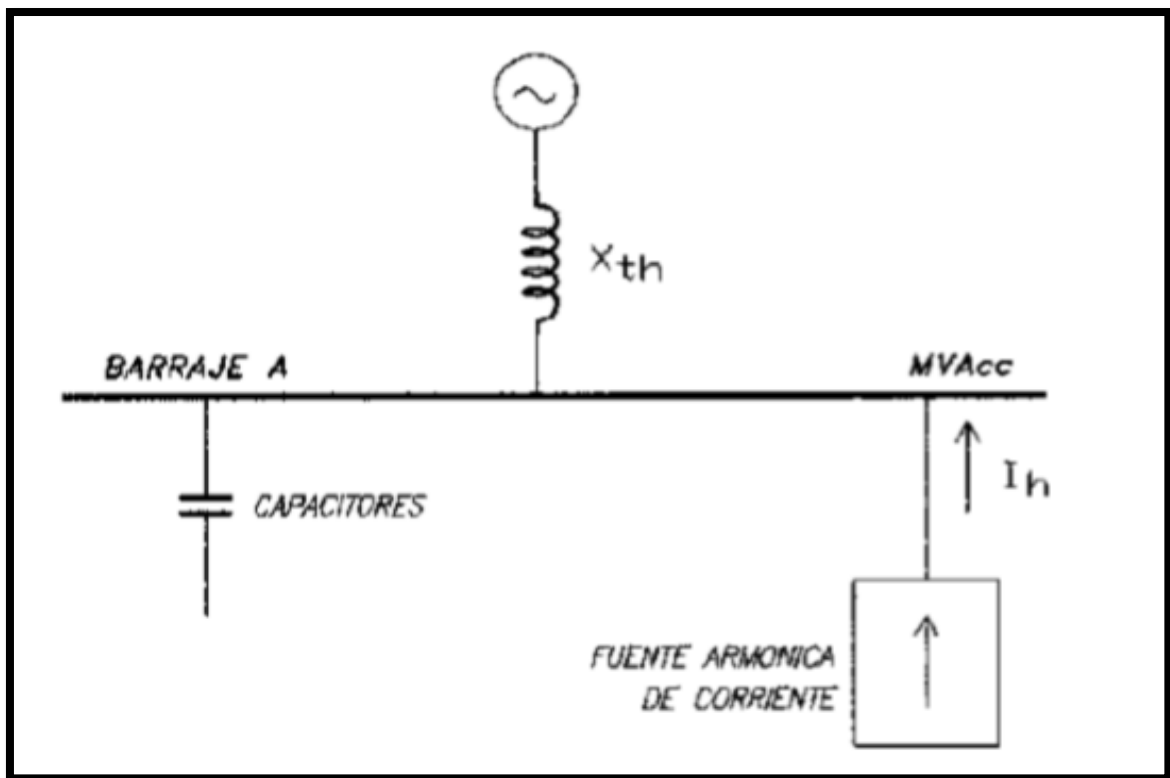


Figura N° 06- Resonancia paralela conectado en el barraje A.
Fuente. La calidad de la energía eléctrica. [7]

La impedancia equivalente de la figura anterior está dado por la siguiente relación.

$$X_{th} = \frac{X_{th}X_C}{X_{th} + X_C}$$

De esta relación, para que se cumpla la condición de resonancia en paralelo, el denominador tiene que reducirse a cero “0”

$$X_{th} + X_C = 0$$

$$X_{th} = -X_C$$

La reactancia capacitiva del sistema en función de la frecuencia angular (ω), está representada de la siguiente manera.

$$X_{th} = \omega L \quad y \quad X_c = \frac{1}{\omega C}$$

Además se tiene que la frecuencia angular fundamental (ω) en función de las potencias esta denotado por.

$$\omega L = \frac{V^2}{MAV_{cc}}$$

$$\frac{1}{\omega C} = \frac{V^2}{MAV_{cap}}$$

Despejando los valores para (L) y (C) y reemplazando en la condición de resonancia se tiene.

$$\omega \frac{V^2}{MAV_{cc}} = \frac{\omega V^2}{\omega MAV_{cap}}$$

Del mismo modo se resuelve para hallar la frecuencia de resonancia paralelo (f_p), ($\omega = 2\pi f_p$)

$$f_p = f \sqrt{\frac{MAV_{cc}}{MAV_{cap}}}$$

Dónde: f_p : frecuencia de resonancia paralela (Hz)

f : Frecuencia fundamental (Hz)

MAV_{cc}: Capacidad de cortocircuito en el barraje

MAV_{cc}: Capacidad de los condensadores en el punto de conexión (barraje) a la Frecuencia fundamental.

2.4 PERTURBACIONES EN REDES ELÉCTRICAS.

Se define a las perturbaciones eléctricas, como aquellas alteraciones instantáneas o momentáneas de las tensiones o corrientes que se producen en los sistema eléctrico, pero que no necesariamente significa el corte o la ausencia de tensión, los mismos que son capaces de ocasionar mal funcionamiento de los equipos eléctricos conectados al sistema eléctrico, además es poco difícil conocer a simple vista las causas que ocasionan dichas perturbaciones, son varios los motivos de tales efectos, sin embargo alguno de ellos resulta de la combinación de.

- ✓ Perturbaciones originados por el usuario.
- ✓ Perturbaciones originados por usuarios aledaños.
- ✓ Perturbaciones originadas desde la empresa eléctrica suministrada.
- ✓ Perturbaciones originadas por efectos electromagnéticos.

Las perturbaciones eléctricas más comunes que se encuentran en un sistema eléctrico detallamos a continuación:

2.4.1 Transitorios. Se considera transitorios en un sistema eléctrico a aquellas variaciones indeseables y momentáneas en la forma de onda, y su tiempo de duración pueden variar desde los nanosegundos hasta los milisegundos, alguna fuente de transitorios existentes en un sistema eléctrico son:

- ✓ Rayos que inciden en las fases de una línea de transmisión.
- ✓ Rayos que inciden directamente en las líneas de transmisión y las SET
- ✓ Operación de interruptores y cuchillas.
- ✓ Fallas de aislamiento.
- ✓ Operación de Recierre de alimentadores.
- ✓ Switcheo de banco de condensadores.
- ✓ Operación de fusibles y limitadores de corriente.

Los transitorios se dividen en dos sub tipos, los que detallamos a continuación.

2.4.1.1 Impulsivos. Denominamos transitorios impulsivos a aquellos eventos instantáneos de cresta alta que elevan el nivel de tensión, corriente o ambos a una frecuencia distinta a la fundamental en direcciones positivas o negativas y que pueden ser eventos muy rápidos de 5ns desde el estado estable, hasta llegar a una cresta de impulso con una duración momentánea menor a 50ns.

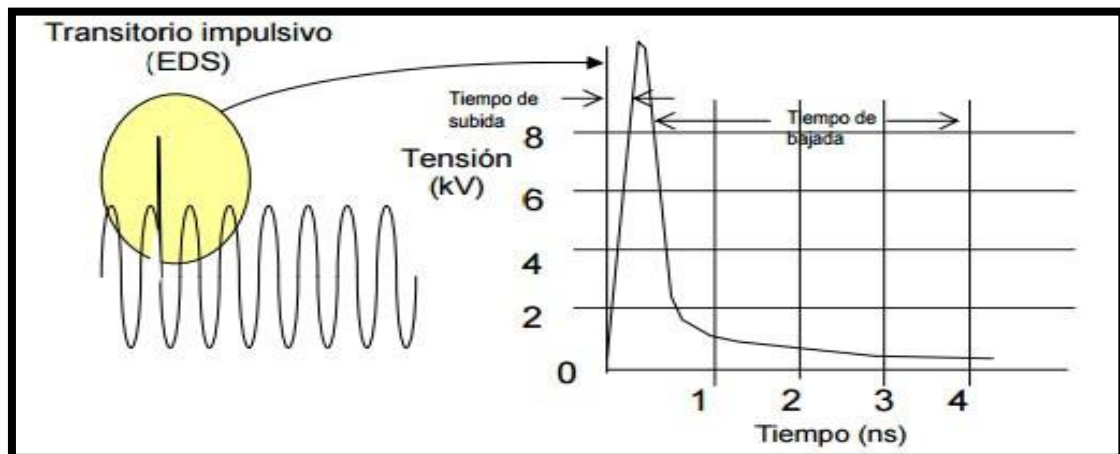


Figura N° 07. Transitorio impulsivo positivo de corta duración
Fuente. Perturbaciones Armónicas. [8]

Los mismos transitorios impulsivos son capaces de excitar la frecuencia natural del sistema eléctrico y ocasionar transitorios oscilatorios.

2.4.1.2 Oscilatorios. Los transitorios oscilatorios son aquellas alteraciones instantáneas, de la onda de tensión que varían desde un estado estable hasta llegar a un pico máximo de tensión y posteriormente bajar en forma oscilatoria hasta reestablecerse a su forma original, que en gran parte son ocasionados por la inserción de bancos de capacitores, y/o la desconexión de gran cantidad de carga eléctrica, son considerados peligrosos, si no se consideran las protecciones adecuadas podrían ocasionar daños a los mismos equipos de la instalación.

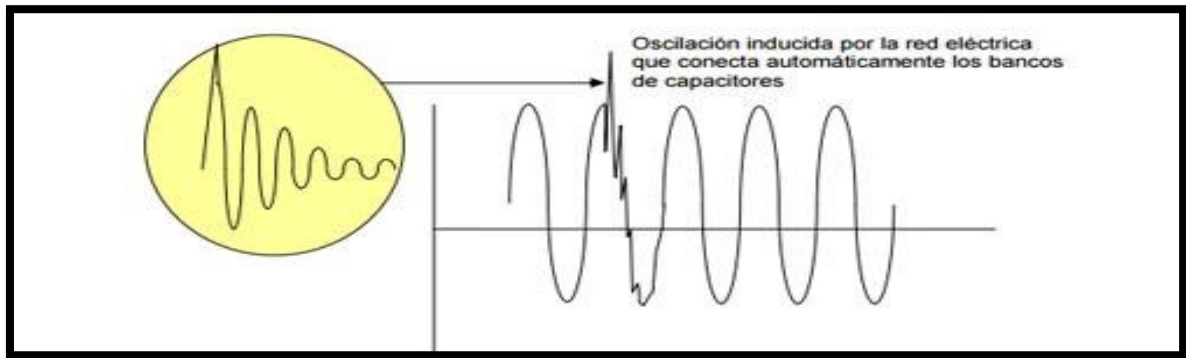


Figura N° 08. Transitorio oscilatorio descendente de corta duración.
Fuente. Perturbaciones Armónicas [8]

2.4.2 Interrupciones. Una interrupción en un sistema eléctrico está definido como la pérdida momentánea o prolongada de la energía eléctrica producto del seccionamiento de fusibles apertura de circuitos, que ocasionan ausencia de tensión eléctrica, lo que a su vez se clasifica de la siguiente manera.

Interrupción	Rango de Duración
Instantáneas	0.5 hasta 30 ciclos
Momentáneas	30 ciclos, hasta 2 seg.
Temporales	2 seg, hasta 2 min.
Sostenidas	> 2 minutos

Tabla N° 12 Clasificación de las interrupciones de acuerdo al rango de duración
Fuente. Elaboración propia con base a la IEEE 1159 de 2009 [4]

La figura muestra la onda senoidal de la tensión en función del tiempo, donde en un tramo se produce una interrupción instantánea de 0.015 segundos aproximadamente, posteriormente se recupera a su estado natural.

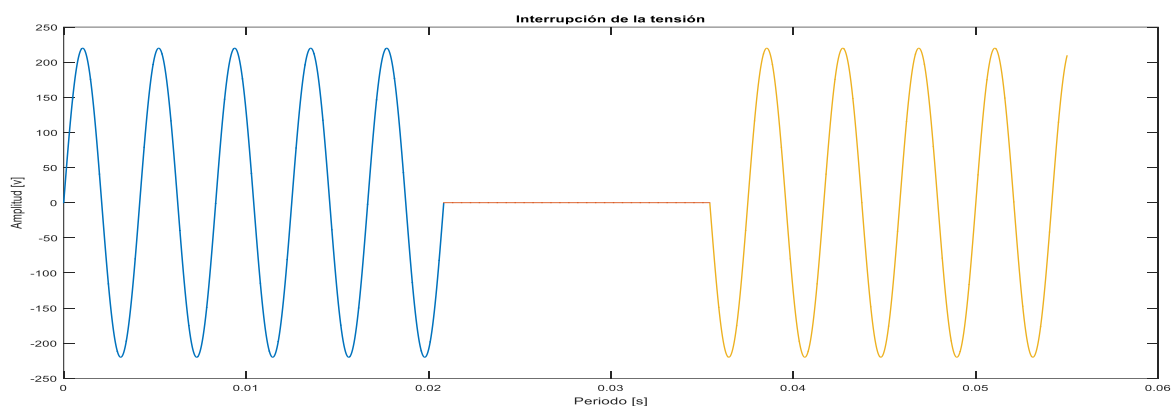


Figura N° 09. Interrupción instantánea de la Tensión [pu]
Fuente. Elaboración propia en base al software MATLAB R-2015

2.4.3 Sobre Tensión de Corta Duración (Swell).

Denominados también como Swell de voltaje es un incremento del valor de la tensión en forma instantánea que va desde el 1.1 al 1.8 en pu, en valores RMS, en cualquiera de las fases de una instalación como se puede apreciar en la siguiente figura. La duración del Swell puede ser de 0.5 ciclos hasta 1 minuto inclusive, y es causado por fallas en los sistemas, la apertura de circuitos y puesta en servicio de bancos de capacitores y Switchero de cargas,

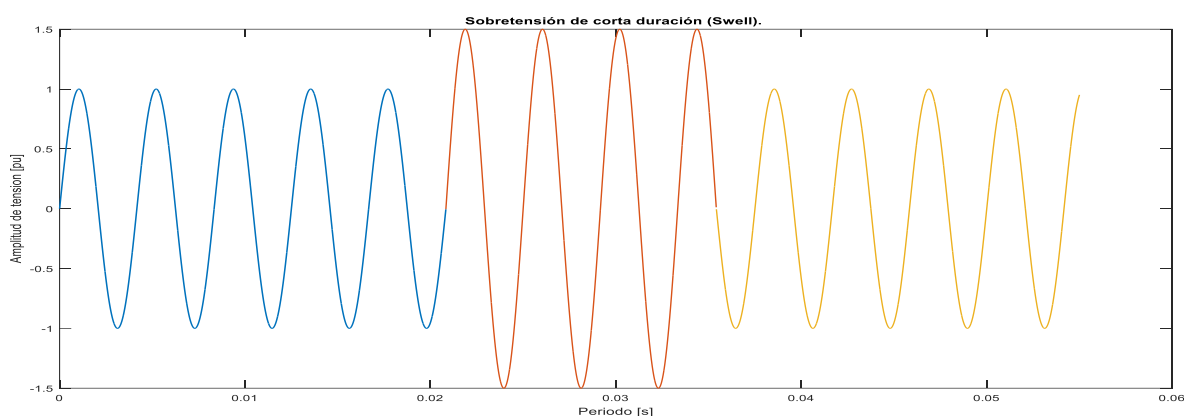


Figura N° 10. Sobre tensión de corta duración (Swell).

Fuente. Elaboración propia en base al software MATLAB R-2015

2.4.4 Sobre Tensión Constante.

La sobretensión eléctrica es un aumento repentino y prolongado de la tensión. Esto se debe a que en los centros de mayor consumo disminuyen el uso de cargas de energía eléctrica, ya sea por motivo en los horarios de trabajo o salidas de servicios de sus equipos eléctricos, pero aún se siguen suministrando energía eléctrica.

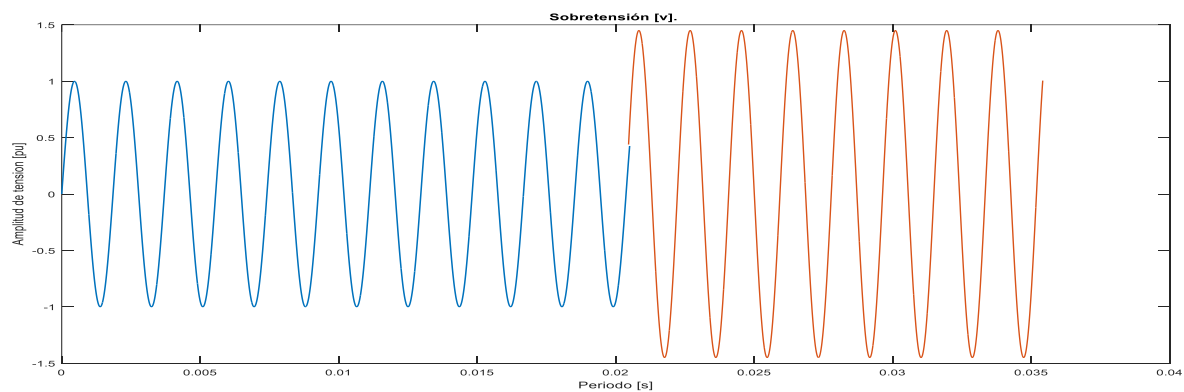


Figura N° 11. Sobretensión constante [pu]

Fuente. Elaboración propia en base al software MATLAB 2015

2.4.5 Sub Tensión de Corta Duración (Sags). Es considera como aquella reducción momentánea del valor de tensión que varía entre 0.1 hasta 0.9 pu de la tensión a una frecuencia dada con un periodo de 0.5 ciclos a 1 minuto, las mismas que son ocasionadas por fallas momentáneas del sistema y en ocasiones también son el resultado de poner en servicio cargas con alta capacidad de corriente de arranque.

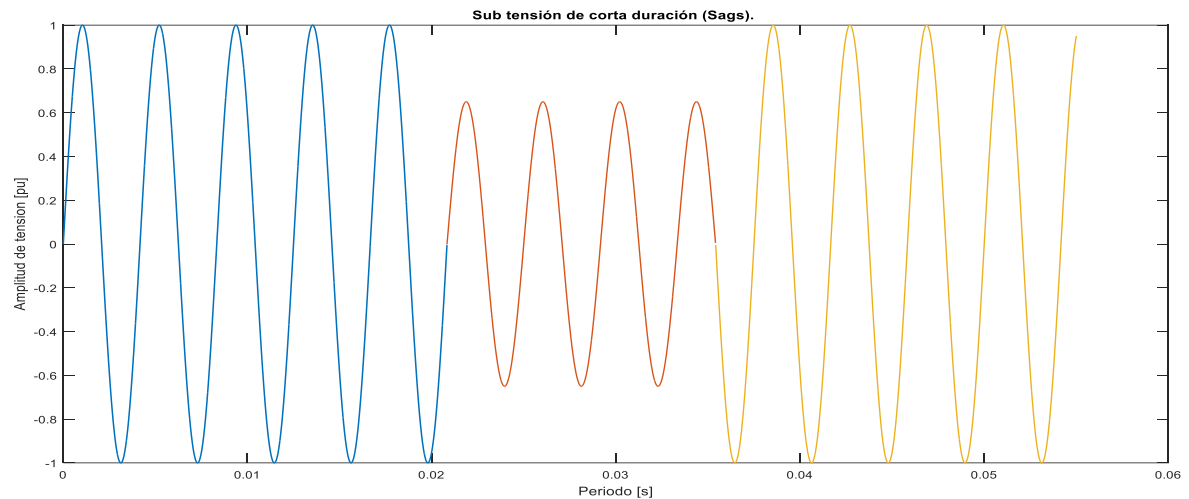


Figura N° 12. Sub tensión de corta duración (Sags).
Fuente. Elaboración propia en base al software MATLAB 2015

2.4.6 Sub Tensión Constante. Las sub tensión es aquella disminución constante en el nivel del voltaje en un sistema eléctrico, Las sub tensiones pueden provocar el sobre calentamiento de los motores, y que podrían ocasionar fallas de equipos con componentes sensibles que en su interior lleves elementos de electrónica de potencia principalmente.

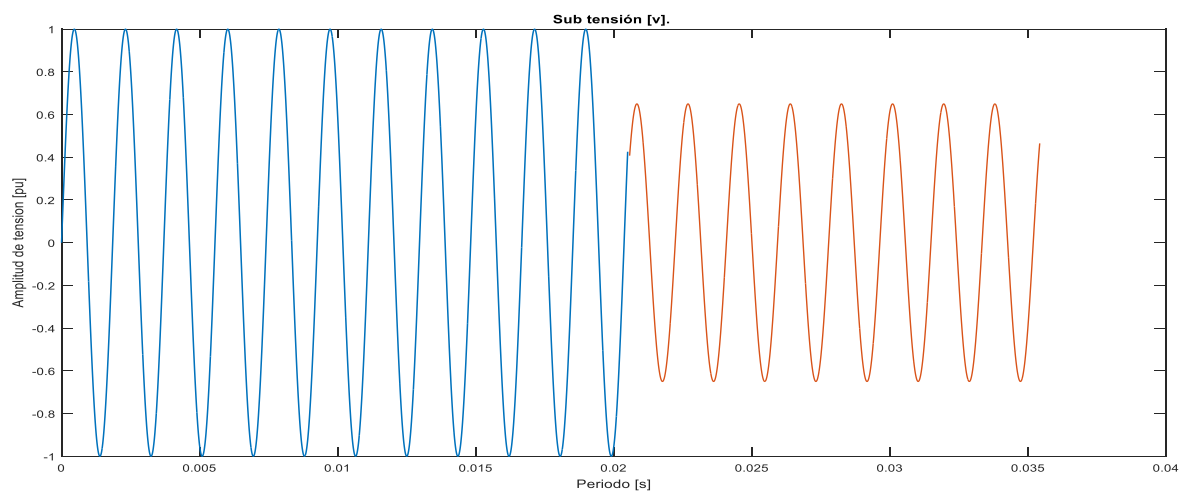


Figura N° 13. Representación de la Sub tensión [pu].
Fuente. Elaboración propia en base al software MATLAB 2015.

2.4.7 Fluctuaciones Rápidas y Bruscas de Tensión.

Las fluctuaciones rápidas de voltaje son variaciones aleatorias con respecto a la amplitud de la tensión sus límites varían de 0.9 pu hasta 1.1 pu de la tensión nominal, también denominadas como Flicker, que son visibles por el ojo humano cuando las luminarias presentan intermitencia al momento de funcionar, que tienen una amplitud menor al 10% del nivel de tensión y duran periodos inferiores a 1 hora, el efecto de dicho fenómeno se debe en ocasiones a la desconexión de cargas o energización de condensadores, además también son ocasionados por las descargas atmosféricas que inciden indirectamente en los sistemas de distribución, y los que no son controlados con los equipos de protección adecuados. [7]

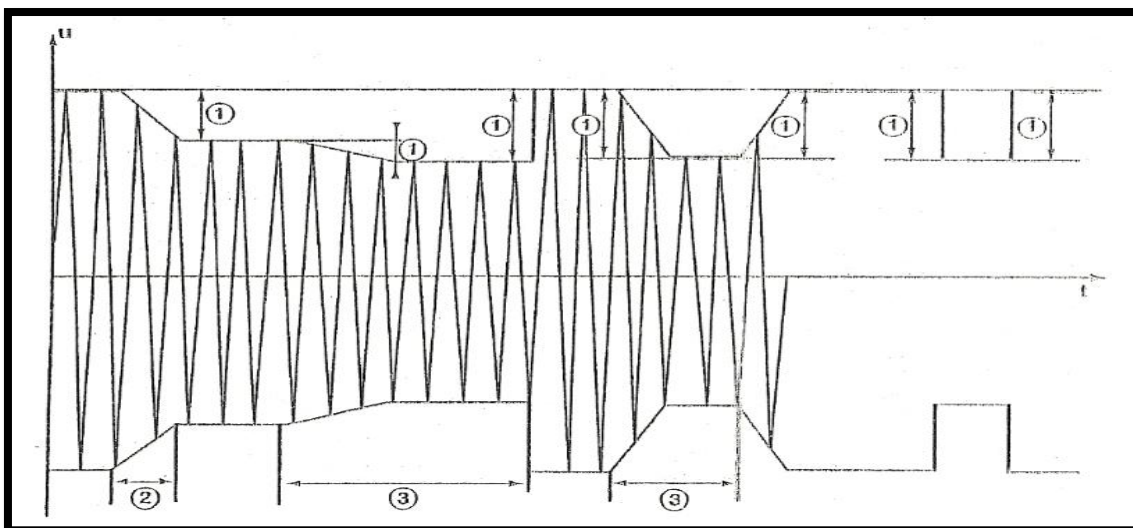


Figura N° 14. Variación de la tensión debido al efecto Flicker.

Fuente. La calidad de la energía eléctrica en los sistemas eléctricos, libro de Enríquez Harper [7]

De la figura anterior se observa lo siguiente.

- ① Variaciones de voltaje (ΔV).
- ② Duración de las variaciones de voltaje.
- ③ Caída de voltaje

2.4.8. Índice de Severidad del Flicker.

“Los índices de severidad del flicker son independientemente variables de acuerdo a la percepción visual del parpadeo de cada persona, dicho esto para poder realizar la cuantificación exacta del flicker, en las normativas vigentes se considera un instrumento de medición de flicker totalmente electrónica y homologado, que nos da el resultado mediante la simulación de una fuente de luz generada por una lámpara de tungsteno y la respuesta de la persona frente al parpadeo de dicha luz, antiguamente la medición del parpadeo del flicker se realizaba mediante la simple observación con el ojo humano los lúmenes emitidos por una lámpara que tenía en su interior un filamento de tungsteno, sin embargo, en la actualidad mediante el avance de la tecnología se logró desarrollar un modelo de respuesta humana manifestándose como incomodidad o fastidio visual frente a la fluctuación de los flujos luminosos, El modelo consiste inicialmente en el encendido de una lámpara de 60 W con filamento de tungsteno en su interior energizada con un voltaje de 230 V, En la Fig. 15, se muestran dos límites de sensibilidad de percepción del parpadeo para dos niveles de tensiones de alimentación.

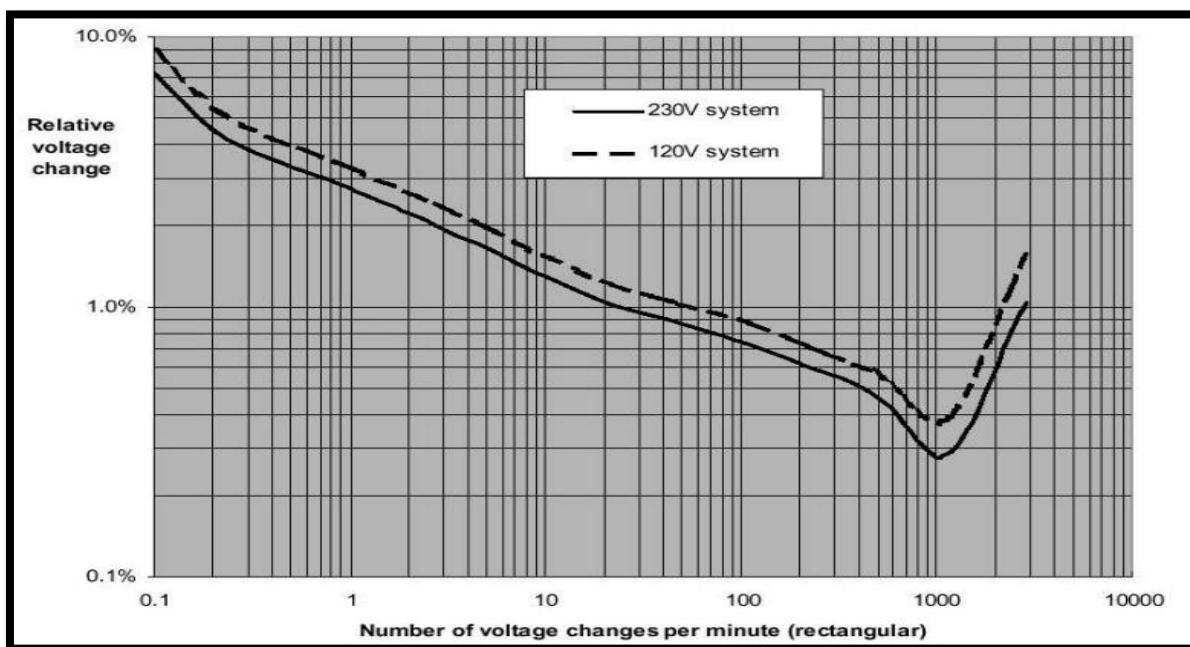


Figura N° 15: Curvas de umbrales de sensibilidad (curvas de igual severidad de parpadeo (Flicker) ante cambios de voltaje en función de la frecuencia, para sistemas de suministro en baja tensión

Fuente: La calidad de la energía eléctrica en los sistemas eléctricos, libro de Enríquez Harper [7]

Del gráfico anterior se puede indicar que, la simulación propuesta con las condiciones presentadas ya sea una lámpara de 60W alimentado con una fuente de dos niveles de voltaje de 230 V y 120V , muestra dos figuras que indican los niveles de irritabilidad máxima, donde los valores por encima del grafico quiere decir que si habría problemas a la vista humana manifestándose mediante irritabilidad o incomodidad, sin embargo, cuando los resultado indican por debajo de la figura, no existiría ningún inconveniente con los lúmenes reflejados por la lámpara de filamento de tungsteno, además se tiene que tener en cuenta que la única diferencia entre los dos niveles de tensión para alimentar dicha lámpara seria que por la lámpara de 230V circula menor corriente que la de 120V, además para el uso nacional solo se consideraría la figura de 230V, ya que en nuestro país consideramos una tensión nominal de 220V para sistemas de iluminación.

Según la Norma UNE- EN-60868-0, especificada en su informe técnico CEI 868-0: 1991, considera que la severidad del Flicker esta manifestada mediante dos términos eléctricos denominados Pst (para una corta duración) y el Plt (para una larga duración). Además ambos términos son considerados medidas adimensionales.

Definición de Pst. Son las fluctuación momentáneas de corta duración que tiene como característica la de ocasionar irritabilidad o molestias en el ojo humano se calcula con un algoritmo que usa 5 puntos denominados y establecidos P0.1, P1, P3, P10, P50, la medición se realiza mediante un periodo de 10 minutos, matemáticamente está expresado de la siguiente forma.

$$P_{ST} = [K_{0.1}P_{0.1} + K_1P_1 + K_3P_3 + K_{10}P_{10} + K_{50}P_{50}]^{\frac{1}{2}} \dots\dots\dots (2.8)$$

Fuente: UNE EN-60868-0 evaluación de la severidad del Flicker. [9]

De donde se tiene que.

P_n = límite de las curvas de probabilidad acumuladas que tienen una probabilidad n% de ser superadas.

K_n = Coeficiente de ponderación dados en la Norma UNE EN-60868-0

La severidad de corta duración de un Flicker está definida en la Norma UNE EN-60868-0 esta expresada de acuerdo con la ecuación [9]

$$P_{ST} = [0.0314.P_{0.1} + 0.0525.P_1 + 0.657.P_3 + 0.28.P_{10} + 0.08.P_{50}]^{\frac{1}{2}} \dots \dots (2.9)$$

Fuente: UNE EN-60868-0 evaluación de la severidad del Flicker [9]

Donde:

$P_{0.1}$ = Nivel superado solo durante 0.1% del periodo de observación.

Definición de Plt. Este término está definido como aquella molestia presentada durante las fluctuaciones a causa de los lúmenes emitidos por una lámpara, sus valores en la práctica se determina mediante los resultados obtenidos en el Pst, por cada 12 valores obtenidos de la medición del Pst, se considera una muestra para el Plt, el periodo de medición es de 12 horas continuas, matemáticamente se determina mediante la siguiente ecuación. [10]

$$Plt = \sqrt[3]{\frac{\sum_{i=1}^N Psti^3}{N}} \dots (2.10)$$

Fuente: La calidad de energía en los sistemas electricos, Henriquez Harper , pag (105) [7]

De donde se tiene que : “Psti(i=1, 2, 3, ...) son los valores consecutivos obtenidos de Pst.

Para determinar la calidad que presenta las luminarias con respecto a los indicadores de flicker se indica, de acuerdo a las Normas Europeas UNE, Informe Técnico CEI – 868, en donde se fijan formalmente los limites de compatibilad, tanto en baja tension, media tension, y alta tension tal como se indica en el siguiente cuadro.

	Límites Aceptables de Flicker	Niveles de Compatibilidad para Planificación	
	BT	MT	AT
Pst	1.00	1.00	0.79
Plt	0.74	0.74	0.58

Tabla N° 13. Límites y valores permitidos de Flicker para un sistema eléctrico.

Fuente. Libro de calidad de la energía eléctrica en los sistemas eléctricos [7]

De acuerdo a la tabla anteriores se especifican los valores limites de flicker tanto en baja tension, en media tension y en alta tension de un sistema electrico en corriente alterna, dicho esto cabe la posibilidad que un cliente industrial al momento de conectarse a la red este inyectado estos fenomenos perjudiciosos y perturbadores, para tal caso hayque considerar los siguientes puntos al momento de realizar un diseño electrico.

- ✓ Se tiene que considerar la potencia de la carga perturbadora
- ✓ Se tiene que considerar la potencia de cortocircuito en el punto de conexión común.
- ✓ La existencia de cargas aledañas que perturban la red.
- ✓ La cantidad de clientes existentes que podrían ser afectados por el sistema.
- ✓ La proyección de la demanda en la red

Los niveles de flicker individuales tolerables en un sistema eléctrico, en alta tensión, media tensión y baja tensión, se muestran en la siguiente tabla.

Niveles de Flicker Individuales Aceptables en BT, MT, AT	
Pst	0.35
Plt	0.25

Tabla N° 14. Niveles individuales aceptables de Flicker para BT, MT, AT.
Fuente. La calidad de la energía eléctrica en los sistemas eléctricos" [7]

2.5 ARMÓNICOS.

Los armónicos en general son ondas de voltajes o corrientes distorsionadas presentes en un sistema eléctrico, que en la mayor parte son generadas por cargas no lineales, que para su funcionamiento necesitan energía a una frecuencia mayor o distinta que la frecuencia fundamental $> (60 \text{ Hz})$, además podemos decir que es el resultado deformado de la tensión eléctrica producto de la utilización de varios equipos funcionando a distintas frecuencias, que para descomponer en frecuencias múltiplos de la frecuencia nominal $(60n)$, necesitamos utilizar software computacionales complejos, o mediante la utilización de la serie matemática de Fourier.

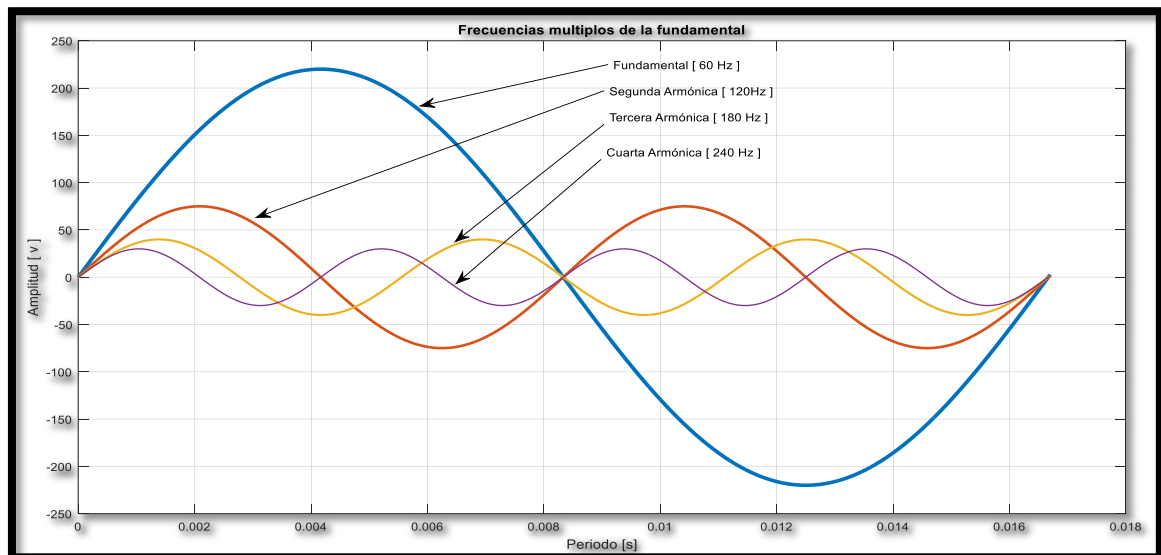


Figura N° 16. Representación de Orden de las Armónicas pares e impares de tensión.
Fuente: Elaboración propia con el software Matlab 2015Ra

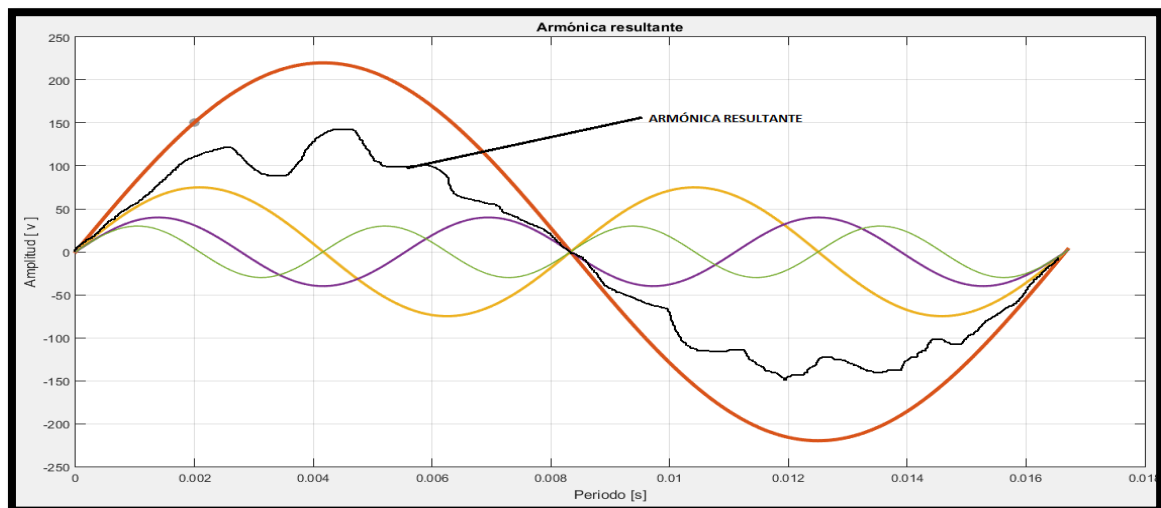


Figura N° 17. Representación de la armónica Resultante.
Fuente. Elaboración propia con el software Matlab 2015Ra.

2.5.1 Definición de Cantidad de Armónicos. Convencionalmente existen definiciones usadas para describir las cantidades eléctricas en el estudio de un sistema eléctrico de potencia que operan senoidalmente en estado estable. Pero en un ambiente contaminado de armónico, la teoría que considera las cantidades eléctricas necesita ser redefinidas para distinguir esas cantidades armónicas y adecuarlas a una frecuencia fundamental del sistema eléctrico. En el siguiente cuadro mostramos el resumen de los índices más comunes para la calidad de tensión en la red.

Tensión RMS	Corriente RMS	Potencia Aparente
$V_{RMS} = \sqrt{\sum_{h=1}^N (V_h)^2}$	$I_{RMS} = \sqrt{\sum_{h=1}^N (I_h)^2}$	$S = V_{RMS} * I_{RMS}$ $S_{3\phi} = \sum_{j=a,b,c} V_{RMSj} * I_{RMSj}$
Tensión instantánea	Corriente Instantánea	Potencia Instantánea
$v(t) = \sum_{k=1}^N \sqrt{2} V_k \sin(k\omega_1 t + a_k)$	$i(t) = \sum_{k=1}^N \sqrt{2} I_k \cos(k\omega_1 t + a_k - \varphi_k)$	$p(t) = v(t) * i(t)$
Potencia Reactiva	Potencia media	Potencia de Distorsión
$Q_1 = V_1 I_1 \sin \varphi_1$	$P = \frac{1}{T} \int_0^T v(t) * i(t) dt = \sum_{k=1}^N V_k I_k \cos \varphi_k$	$S^2 = P^2 + Q^2 + D^2$
Factor de Potencia	Distorsión Armónica Total	
$FP = \frac{P}{S} = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2 + D^2}}$	$THD = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^N (V_h)^2}}{V_1} * 100 (\%)$	
Factor de Desbalance	Factor de Cresta	Factor Flicker
$FD = \frac{ V - }{ V + }$	$FC = \frac{V_{pico}}{V_{rms}}$	$FF = \frac{\Delta V}{ V }$

Tabla N° 15- Representación de fórmulas en función de las armónicas.

Fuente. Libro de perturbaciones armónicas, Eric Felice" 2001. [8]

2.5.2 Parámetros de los Armónicos. Los armónicos se clasifican en tres parámetros eléctricos importantes que están perfectamente definidos que son: Orden de armónico, Frecuencia y Secuencia, que definen la función de los armónicos correspondiente en los sistemas eléctricos.

En resumen los parámetros de las armónicas se pueden visualizar de esta manera.

Parámetros de las armónicas												
Orden de armónico (h)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	...
Frecuencia (Hz)	60	120	180	240	300	360	420	480	540	600	660	...
Secuencia	+	-	0	+	-	0	+	-	0	+	-	...

Tabla N° 16- representación de la secuencia de los armónicos.

Fuente. Elaboración propia

2.5.2.1 Orden. Teniendo en cuenta que la frecuencia en el sistema eléctrico peruano es de (60 Hz), entonces el orden (n) del armónico se determina como un número entero múltiplo de la misma frecuencia, para los valores naturales de n= (1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11....), de los cuales nuestra Normativa actual exige la evaluación hasta el orden 40°, Matemáticamente definimos como aquella relación que existe entre la frecuencia del armónico múltiplo de la fundamental f (n) y la frecuencia fundamental f (60) $n = \frac{fn}{f_{60}}$

2.5.2.2. Frecuencia. La frecuencia del armónico está definida como el resultado de multiplicar la frecuencia fundamental (60Hz) por el número de orden (n), como se muestra en el siguiente ejemplo.

$$3^{ra} \text{ Armonica } 3 \times 60 \text{ Hz} = 180 \text{ Hz}$$

$$5^{ta} \text{ Armonica } 5 \times 60 \text{ Hz} = 300 \text{ Hz}$$

$$7^{ma} \text{ Armonica } 7 \times 60 \text{ Hz} = 420 \text{ Hz}$$

$$9^{na} \text{ Armonica } 9 \times 60 \text{ Hz} = 540 \text{ Hz}$$

$$11^{va} \text{ Armonica } 11 \times 60 \text{ Hz} = 660 \text{ Hz}$$

$$13^{va} \text{ Armonica } 13 \times 60 \text{ Hz} = 780 \text{ Hz}$$

Se tiene en cuenta que los armónicos de orden impar son las más perjudiciales y que se encuentran en mayor cantidad en los sistemas eléctricos, sin embargo, los armónicos de orden par solo aparecen cuando hay simetría en las fases.

2.5.2.3 Secuencia. Se denomina secuencia de armónicos al desfase que existe entre las líneas eléctricas de un sistema, normalmente en un sistema balanceado los ángulos que forman las fases de tensión y corriente es de 120 °, pero esto no ocurre siempre ya que la

existencia de armónico en las redes hace que estos Ángulos varíen de acuerdo a complejidad del sistema y al desbalance del mismo que están determinados por su signos positivos, negativos, y secuencia cero. [10]

Voltajes por Fases	Armónicos Generados	Secuencias Generados	Efecto mecánico producido en motores AC
$V_{ah} = V_h \cdot \angle(\theta h)$	$h = (3n)$	Secuencia cero	No giran ,pero incrementa la corriente del neutro
$V_{bh} = V_h \cdot \angle(\theta h - 120h)$	$h = (3n + 1)$	Secuencia Positiva	Giran en mismo sentido de la fundamental
$V_{ch} = V_h \cdot \angle(\theta h + 120h)$	$h = (3n - 1)$	Secuencia Negativa	Giran en sentido contrario de la fundamental

Tabla N° 17- Bases para la obtención de la secuencia de los armónicos.

Fuente. Power system transients [Juan A. Martínez –Velazco] [10]

En términos del efecto de rotación del campo magnético de un motor trifásico, los armónicos de secuencia positiva, son los que giran en sentido directo cuando se le aplica una tensión a un motor de inducción trifásico, esto hace que el motor gire hacia adelante, y el campo magnético producido por las armónicas de secuencia negativa giran en sentido contrario y tienden a cancelar el campo magnético giratorio y hasta podrían ocasionar que los motores se quemen, los de secuencia cero o conocidos como frecuencia triple no rotan, ellos se agregan en el cable neutro se un sistema trifásico de cuatro hilos.

2.5.3 Distorsión Armónica Total. Los THD vienen a ser la sumatoria de las armónicas de tensión o corriente individuales presentes al momento de realizar una medición con un equipo analizador de redes debidamente calibradas. [11]

Del mismo modo se entiendo por tasa de distorsión armónica a los valores rms de los armónicos divididos entre el valor rms de la fundamental, la distorsión se presenta en forma de porcentaje.

$$\frac{\text{Valor rms de todo los armónicos}}{\text{Valor rms de la fundamental}} \%$$

Para determinar las cantidades de distorsión armónica, de acuerdo a la normativa peruana se consideran hasta el orden 40, sin embargo, en las normativas internaciones se consideran hasta el orden 50 así como lo recomienda la IEEE 1159 – 2002.

$$THD_v = \frac{\sqrt{(\sum_{h=2}^{h=50} [V_h]^2)}}{V_1} * 100(\%) \quad .ecu(2.11)$$

“Dónde: THD_v = distorsión armónica total de tensión (%)

V_h = componente armónica de tensión de orden h

V_1 = componente fundamental de tensión

$$THD_i = \frac{\sqrt{(\sum_{h=2}^{h=50} [I_h]^2)}}{I_1} * 100(\%) \quad .ecu(2.12)$$

Dónde: THD_i = distorsión armónica total de la corriente (%)

I_h = componente armónica de corriente de orden h

I_1 = componente fundamental de corriente

$$TDD = \frac{\sqrt{(\sum_{h=2}^{h=50} [I_h]^2)}}{IL. \max} * 100(\%) \quad .ecu(2.13)$$

Dónde: TDD = Índice de distorsión total de la demanda

I_h = es la componente armónica de corriente de orden h

$IL. \max$ = corriente máxima en carga

El índice de distorsión de demanda total, es la distorsión armónica de corriente pero con respecto a la corriente de carga máxima para un periodo de demanda de 15 a 30 minutos, expresada en % y se simboliza como TDD . Es similar al (TDD_i) con la diferencia de que los índices de armónicos individuales $HD_n(i)$ se obtienen con respecto al valor rms de la corriente total o de demanda y no con respecto al valor rms de la fundamental” [10]

2.5.4 Origen de los Armónicos. Para entender el origen de los armónicos es necesario tener en cuenta bien en claro el concepto de cargas lineales y cargas no lineales, puesto que para las cargas lineales al aplicarle una señal de tensión senoidal el resultado en corriente también será una señal senoidal aunque no necesariamente de la misma amplitud, dichas cargas están compuestas principalmente por resistencias, impedancias y capacitancias, para el caso de las cargas no lineales al aplicarle una tensión senoidal el resultado de la onda de corriente no tendrá una forma senoidal debido a que sus impedancias son siempre variables, dichas cargas no lineales están presentes en aquellos equipos alimentados por la electrónica de potencia, por ejemplo.

- ✓ Dispositivos que involucran el switcheo electrónico: equipos que utilizan electrónica de potencia para el proceso de switcheo en los dispositivos.
- ✓ Dispositivos con las relaciones voltaje-corriente no lineal, es decir, cuando se excita con un Voltaje de entrada periódico, donde la curva V-I No lineal lleva a la generación de corrientes Armónicas.
- ✓ Dispositivos o elementos que tienen impedancia que depende de la frecuencia múltiplo y que generan armónicos.

En la siguiente figura N° 18 se muestra un circuito con carga RC alimentado con una tensión senoidal a frecuencia de 60Hz, el resultado de dicho circuito con respecto a las formas de onda se mantiene senoidalmente, sin embargo, en la Figura N° 19 se muestra una carga RC que es alimentado por una tensión armónica, donde se observa que la forma de corriente se distorsiona mucho más en comparación con una señal senoidal.

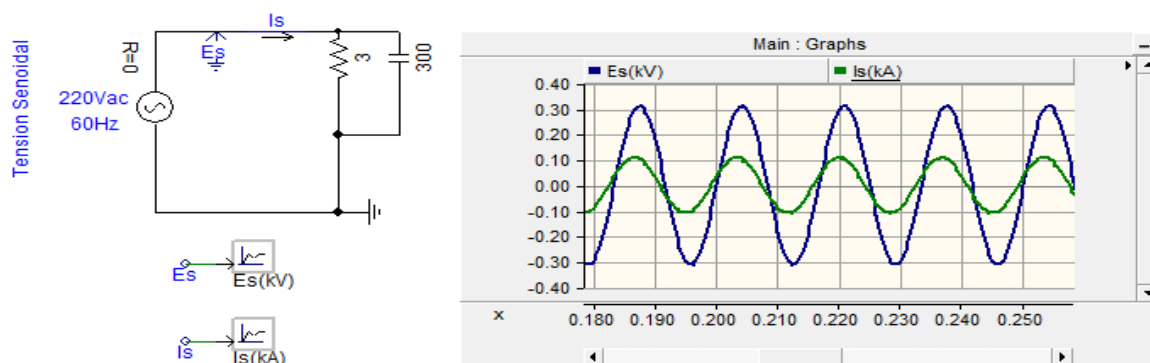


Figura N° 18- Perfil de tensión y corriente para una carga RC, con una tensión de ingreso senoidal.
Fuente: Elaboración propia, en base al software PSCAD.

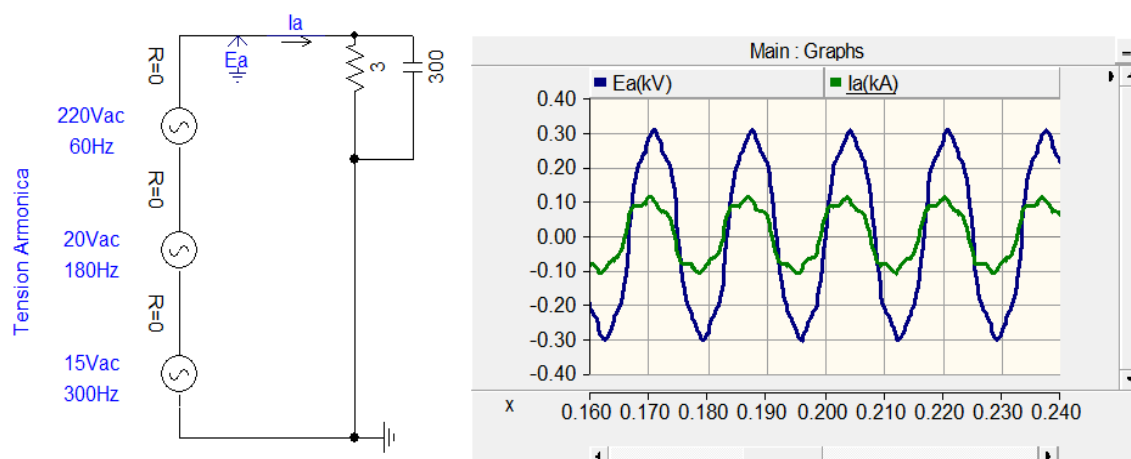


Figura N° 19- Perfil de tensión y corriente para un circuito RC, con una tensión de ingreso Armónico.
Fuente: Elaboración propia, en base al software PSCAD.

ELEMENTOS ELÉCTRICOS	CARACTERÍSTICAS POR LA ARMÓNICA	ÓRDEN DE ARMÓNICA	SOLUCIÓN PREVIA
TRASNFOMADOR TRIFÁSICO	Afecta la impedancia del transformador donde las ondas senoidales no son simétricos con respecto a su valor máximo	La distorsión de debe a las armónicas 3, 9, 12, pero principalmente a la 3a armónica, también se puede presentar la ferorresonancia debida ala impedancia del transformador.	Proporciona una trayectoria para estos armónicos triplens lo que normalmente se consigue con una conexión en triangulo-estrella aterrizada.
MAQUINAS ROTAIVAS (MAQUINAS DE INDUCCIÓN Y SINCRONA)	La distorsión afecta a la fuerza Electromotriz fundamental (f.m.m),	La distorsión se debe a la 5,7 armónica principalmente.	
HORNO DE ARCO ELÉCTRICO	Por su gran gama de frecuencias, los niveles de armónica varían en función del tiempo y a la misma componente fundamental.	De acuerdo con el porcentaje de distorsión respecto a la componente fundamental al inicio de la fundición tenemos 2, 3, 4, 5, 7, 7.7, 5.8, 2.5, 9.2.	
CONTROLADORES DE MOTORES DE C.A	En este caso depende del controlador, esto es si es de 6 pulsos ó 12 pulsos, también si tiene inversor o filtro capacitivo.	Para un controlador de 6 pulsos se tiene 5, 7, 11, 13, 17, 19 y si es de 12 pulsos tenemos orden de armónicos de 11, 13, 23, 25 especialmente.	Los controladores pueden ser de un número mayor de pulsos para generar armónicos de gran orden para no afectar demasiado la red.

Tabla N° 18- representación de las principales fuentes de armónicos.
Fuente: Elaboración Propia.

2.5.5 Efecto de los Armónicos. Los efectos que dejan los armónicos en una instalación eléctrica, es prácticamente perjudicial y destructible, que se inicia con la utilización de cargas consideradas no lineales o las que tengan componentes electrónicas, que a su vez generan la aparición de tensiones armónicas a causa de la circulación de corrientes armónicas, La utilización de estas cargas no lineales provocan caídas de voltes en forma distorsionadas que hacen que en los puntos de conexión no lleguen voltajes puramente senoidales. También se puede mencionar como uno de sus efectos la reducción de la vida útil de los equipos así como la degradación de sus aislamientos y mal funcionamiento de los elementos (conductores, alimentadores, transformadores, subestaciones, y las cargas) de un sistema eléctrico en general. Los efectos perjudiciales de estas armónicos dependen del tiempo de la carga instalada como son los efectos instantáneos y a largo plazo. Algunas de las cuales detallamos a continuación:

EQUIPOS	EFECTOS
Transformadores	Sobrecalentamientos de partes activas cuando las cargas son superiores a 90% de la potencia nominal.
Condensadores	Los condensadores se funden cuando la corriente es 130 % superior la corriente nominal.
Motores de inducción	Sobrecalentamientos de partes activas si en la tensión de alimentación existen los armónicos de secuencia cero.
Cables de conexión	Recalentamientos de aislantes si el valor efectivo de la corriente es superior a la que soporta el conductor.
Equipo de computación	"Pérdida de dato y daños en algunos componentes electrónicos debido a sobretensiones, ocasionados por fallas en sus sistemas de protección".

Tabla N° 19- representación de los efectos de los armónicos.

Fuente. Elaboración propia

2.5.6 Fundamento Matemático:

La serie de Fourier es la herramienta matemática, que mediante un procedimiento permite determinar las magnitudes y fases de cualquier función armónica como una suma de

funciones individuales y senoidales, ya sea de la frecuencia fundamental (60Hz), o múltiplos.

Que son generados en la mayor parte por ciertos dispositivos de la electrónica de potencia

$$f(t) = f(t + T), \quad w = \left(\frac{2\pi}{T}\right) = 2\pi f, \quad f(wt) = f(wt + 2\pi)$$

TEOREMA DE FOURIER		
$f(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} [a_n \cos(hwt) + b_n \sin(hwt)]$		
coeficientes	$a_0 = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) dt = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(wt) dw$	Componente continua
	$a_n = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \cos(hwt) dt = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(wt) \cos(hwt) dw$	Componente Armónica
	$b_n = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \sin(hwt) dt = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(wt) \sin(hwt) dw$	

Tabla N° 20- representación matemática de la serie de Fourier.

Fuente. Calculo de Transitorios electromagnéticos en Sistemas de Energía [11]

El teorema de Fourier es aquella función trigonométrica compleja para representar cualquier función armónica, y descomponerlo en partes más simples denominados ordenes armónicos compuesto por pares e impares, consta de coeficientes armónicas, y componentes continua, los armónicos pares representados por la componente continua son relativamente muy bajos en comparación con los de orden impar.

Se deduce que la función trigonométrica de Fourier es la descomposición de una función armónica en frecuencias múltiplos enteros de la fundamental, además dicha descomposición nos ayuda a entender mejor los armónicos individuales, también se tiene en cuenta que la componente continua a_0 se iguala a 0.

2.5.7 Solución al Problema de los Armónicos. Un método de solución práctica ante los efectos ocasionados por los armónicos en un sistema eléctrico, consiste en realizar una medición simple con el objetivo de averiguar qué tipo de armónico es el de mayor magnitud, por ejemplo si es el armónico de orden tres, entonces, se sabe que este tipo de armónicos es ocasionado por el desbalance de cargas monofásicas en un sistema trifásico, por lo tanto lo adecuado sería hacer un balance de cargas, y si el sistema presenta conductores de neutro se recomendaría sobredimensionar el conductor neutro. De tal manera que sirva como descarga de los armónicos por el conductor de neutro.

Existen otros métodos de solución, como son la independización de circuitos especiales, el sobredimensionamiento de conductores de alimentación, el diseño e inserción de filtros armónicos, de orden específicos.

2.5.8 Cancelación de Armónicos. Existen varios métodos de cancelación de armónicos, uno de los más empleados por su efectividad es la utilización de filtros diseñados adecuadamente para cada armónico en especial ya sean por ejemplo, los filtros Armónicos sintonizados son empleados para atenuar los de orden (3, 5 , 7), sin embargo, los filtros amortiguados son utilizados para atenuar los de mayor orden (de 9 en adelante), además el otro método de cancelación de armónicos consiste en la construcción de rectificadores de 12 pulsos mediante la conexión de 2 rectificadores cada uno de 6 pulsos conectado en el lado secundario de un transformador conectado en el primero en estrella y el segundo en triángulo, que a su vez está conectado a las barras de un punto de conexión, esto hace que exista un desfase de 30° entre las fases de alimentación.

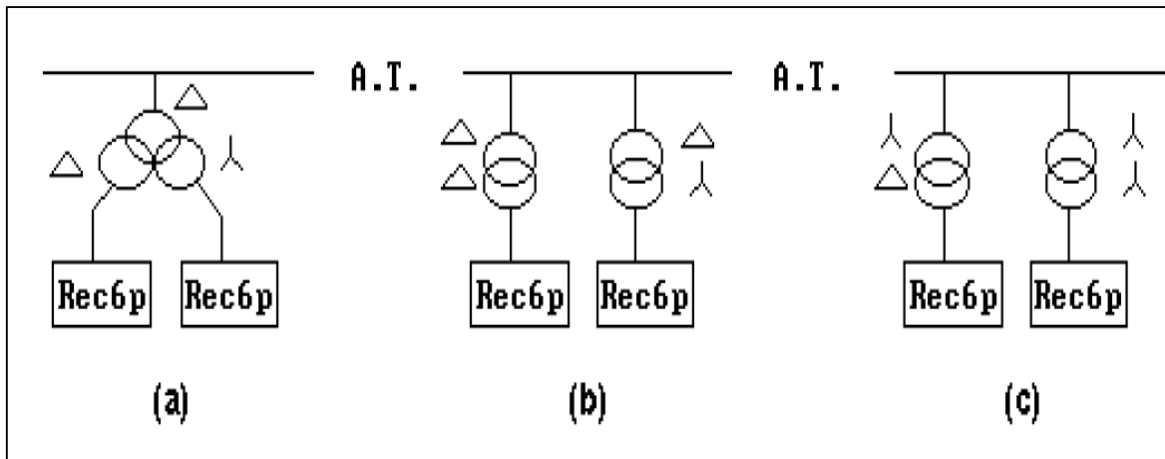


Figura N° 20- Conexión de un rectificador de 12 pulsos mediante 2 rectificadores de 6 pulsos.
Fuente: "Power systems harmonics". [6]

2.6 FILTROS. Los filtros son equipos eléctricos diseñados adecuadamente de forma particular que están compuesto y conectados eléctricamente por elementos eléctricos como son resistores, condensadores y bobinas, principalmente, que al conjunto de ellos se les llama filtros armónicos, donde el único objetivo es de mitigar los problemas ocasionados por las cargas no lineales generadoras de armónicos en los sistemas eléctricos de una instalación, además su uso es muy aceptable en lugares donde hay problemas tales como fusión de fusibles que protegen a capacitores, interferencia telefónica, mala operación de equipos sensibles, etc. Los métodos de solución ante los armónicos en las redes eléctricas consisten en realizar el diseño, implementación y configuraciones de equipos tales como filtros armónicos, que son usados en la mayor parte para la eliminación o minimización de armónicos a niveles establecidos y aceptables por las normas reconocidas. La clasificación de estos filtros se divide en dos grupos, los Filtros Pasivos y los Filtros Activos, estos últimos no serán tratados por no corresponder al proyecto de Investigación.

2.6.1 Filtros Pasivos. los filtros pasivos son aquellos equipos eléctricos compuesto únicamente por la combinación de bobinas, resistores y condensadores, conectados eléctricamente, en serie, en paralelos o en la combinación de ambos, los cuales presentan una impedancia muy baja para una frecuencia entera de un armónico definido, Una de las

características de los filtros pasivos es la baja impedancia que presentan en la frecuencia de operación para la que fueron diseñados, y que necesariamente van conectados en conjunto con los banco de condensadores, para que, así puedan aportar cierta cantidad de potencia reactiva al sistema, con la finalidad de mejorar o elevar el nivel del factor de potencia.

En la siguiente figura se muestran los tipos de filtros pasivos más empleados para mitigar armónicos, entre los cuales se encuentra el filtro sintonizado, el que se consideró como criterio de diseño, para el presente estudio de tesis.

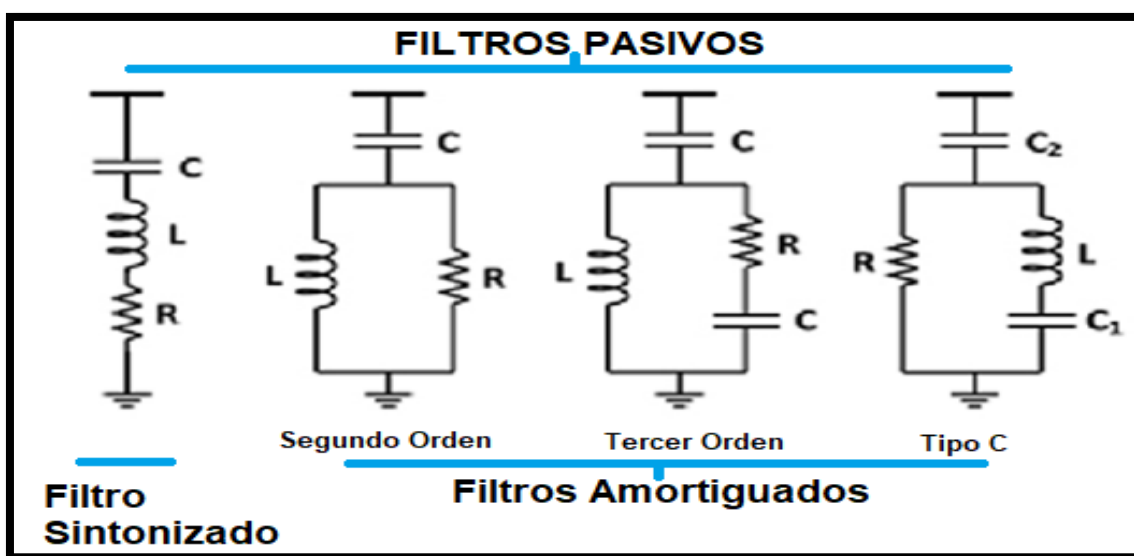


Figura N° 21- Representación de los filtros pasivos.
Fuente: "Power systems harmonics" [6]

2.6.1.1 Filtro sintonizado.

Este tipo de filtro está compuesto por un circuito RLC en serie para mitigar un armónico en especial, y son los más empleados para la solución de problemas en las industrias eléctricas, están relacionados directamente con el amplio valor del factor de calidad "Q" el cual indica el ancho de banda de sintonía, es decir, que sintonizan a una frecuencia determinada, los valores establecidos para el factor de calidad, por las Normas Internacionales, entre ellas la IEEE 519: 2002, varían entre los rangos de [20 a 30], de los cuales son utilizados para calcular la resistencia (R) mediante la siguiente relación.

$$Q = \frac{X_0}{R} \quad \dots (2.14)$$

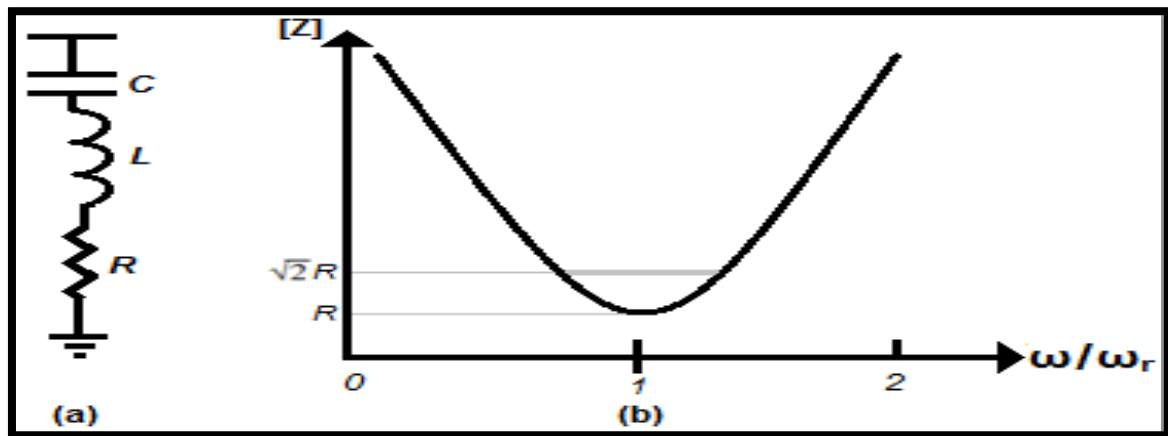


Figura N° 22 Filtro Sintonizado, esquema (a) y figura de comportamiento impedancia vs frecuencia (b).

Fuente. "Power systems harmonics" . [6]

Además se puede indicar que estos filtros sintonizados son exclusivamente para la compensación de armónicos de 3°, 5°, y 7° orden independientemente para cada uno de ellos, en tal caso se utilizarán filtros compuestos por varias ramas R-L-C, que son sintonizados a una de las frecuencias de los armónicos que se quiere corregir. La impedancia de este filtro sintonizado está determinado por la siguiente relación.

$$Z = R + j \left(\omega L - \frac{1}{\omega C} \right) \quad \dots (2.15)$$

En los filtros sintonizados se cumple que la Z es igual a R , entonces la ecuación anterior se reduce a.

$$\omega n = 2\pi f n$$

Características Generales de los filtros Sintonizados:

- ✓ Son utilizados para la mitigación de un armónico determinado.
- ✓ Se considera frecuencia de sintonía aquella frecuencia que resuena el filtro diseñado.
- ✓ La sintonía del filtro se ajusta a la frecuencia que se quiere mitigar.
- ✓ La impedancia del filtro diseñado es mínima a la frecuencia de sintonía.
- ✓ Para el diseño de filtros se considera un factor de calidad de [20 - 30], esto hace que la impedancia sea estrecha o abrupta.
- ✓ Son mayormente empleados, para corregir armónicos ocasionados por la utilización de cargas eléctricas que contengan rectificadores de 6 pulsos.

Ventajas:

- ✓ Se puede sintonizar exactamente a un armónico en especial.
- ✓ Estando conectados en la red proporciona reactivos requeridos a (60 Hz).
- ✓ La resistencia del inductor presenta una baja resistencia.
- ✓ Son sencillos al momento de realizar el diseño.

Desventajas:

- ✓ Desintonización en el tiempo, producto de cambios topológicos.
- ✓ No poseen dinámica de seguimiento de variación aleatoria de las inyecciones armónicas.
- ✓ Interactúan con el sistema ocasionando resonancias en paralelo del mismo modo que los bancos de capacitores.

Parámetro asociado ante la respuesta de los Filtros.

Existe un conjunto de parámetros que definen el comportamiento de los filtros y es necesario conocerlos para comprender el proceso de diseño, en esta ocasión se presentan los más importantes.

Diseño y Especificaciones de los Filtros Sintonizados.

Para elaborar el mejor diseño de filtros armónicos sintonizados, donde realmente cumpla el objetivo de reducir o eliminar los armónicos hasta los niveles permitidos por las normativas vigentes, se sigue lo siguiente.

Criterios de Diseño.

- ✓ Impedancia equivalente total del sistema
- ✓ Distorsión Armónica de tensión al cual se quiere reducir o eliminar.
- ✓ Distorsión Armónica de corriente al cual se quiere reducir o eliminar.
- ✓ Armónica de tensión Individual al cual se quiera sintonizar el filtro que se va a diseñar.
- ✓ Potencia reactiva requerida por el sistema.

Consideraciones en el diseño de los Filtros.

- ✓ Tener identificado las cargas contaminantes.
- ✓ Tener definido el orden de Armónicos.
- ✓ Considerar los espectros de corriente Armónica.
- ✓ Tener en cuenta la potencia reactiva requerida para compensar en el sistema.
- ✓ Valores límites de distorsión establecidas por las normativas existentes.
- ✓ Considerar la respuesta en frecuencia del filtro para diferentes configuraciones y puntos de operación del sistema.
- ✓ Considerar la frecuencia de resonancia del sistema antes y después de la puesta en servicio del filtro.
- ✓ Considerar el voltaje y corriente transitorio durante y después de la conexión del filtro al sistema.
- ✓ Considerar los valores determinados de tensión y corriente de los componentes.

2.6.1.2 Ecuaciones para el Diseño de filtro Sintonizado.

- ✓ Impedancia del filtro Pasivo. $Z = R + j \left(WL - \frac{1}{WC} \right) \Omega ohm$
- ✓ Determinación del capacitor mediante la potencia reactiva necesaria.

$$X_C = \frac{(V_L)^2}{Q_C}$$

- ✓ Determinación de la frecuencia de sintonía f_0 mediante la frecuencia armónica que se requiere atenuar.

$$f_0 = \frac{1}{(2\pi) * (\sqrt{LC})}$$

- ✓ Determinación de la capacidad del inductor mediante el tamaño del capacitor.

$$X_L = \frac{X_C}{f_0}$$

- ✓ Determinación del factor de calidad mediante la resistencia del inductor.

$$Q_0 = \frac{X_0}{R}$$

2.6.2 Filtros Amortiguados. Este tipo de filtros amortiguados, son equipos eléctricos compuesto por los elementos RLC de un circuito, además están conectados en paralelos, que son diseñados para atenuar armónicos desde el orden 9 en adelante, además con un solo diseño se puede mitigar varios armónicos en conjunto, se caracteriza por tener un bajo factor de calidad Q (0.7 – 1.4), que presenta una reactancia capacitiva a una frecuencia fundamental y presenta una impedancia mínima a frecuencias mayores existentes en el sistema.

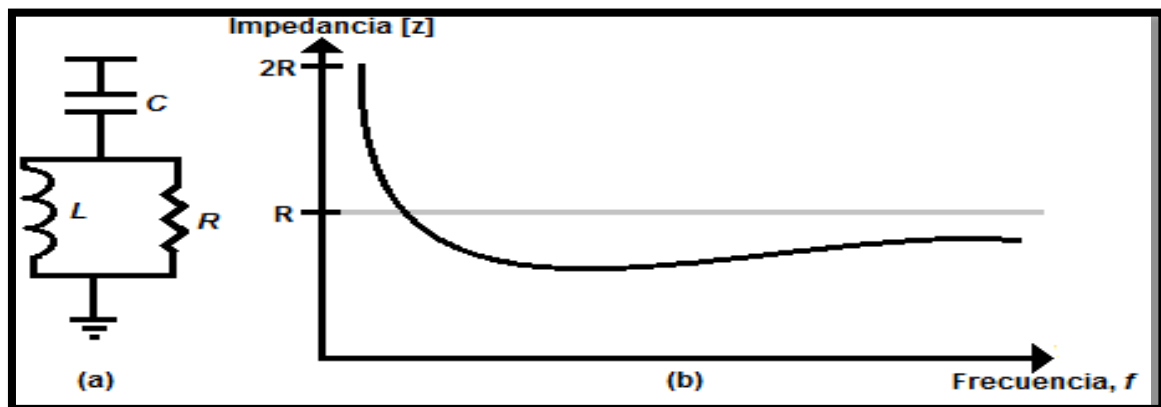


Figura N° 23. Filtro Amortiguado segundo orden, esquema (a) y figura de comportamiento impedancia vs frecuencia (b).
Fuente. "Power systems harmonics". [6]

La aplicación de estos filtros amortiguados o también denominados paso-altos se emplean mayormente para mitigar un conjunto de armónicos generalmente mayores a 11°, que presentan magnitudes bajas en comparación con los de ordenes inferiores.

La impedancia equivalente del filtro está relacionada de la siguiente manera.

$$Z = \frac{1}{j\omega C_F} + \left(\frac{1}{R_F} + \frac{1}{j\omega L_F} \right)^{-1} \Omega ohm$$

La frecuencia de sintonía para el filtro amortiguador viene dado por la siguiente expresión.

$$f_r = \frac{1 + Q}{2\pi\sqrt{(Q^2 - 1) * LC}} \text{ Hz}$$

Características de Filtros Amortiguados:

- ✓ Son empleados para mitigar un amplio rango de armónicos.
- ✓ Son empleados cuando los armónicos medidos en el sistema no tienen una frecuencia definida, lo que ocurre en los ciclo conversores o también conocidos como hornos de arco.
- ✓ Presentan una frecuencia a la cual se sintonizan en conjunto.
- ✓ Para una baja frecuencia de sintonía presentan altas impedancias.
- ✓ Para los filtros amortiguados el factor de calidad Q es relativamente bajo que está comprendido entre los valores $[0.7 - 1.4]$. [6]

Ventajas.

- ✓ Mitiga un amplio rango de espectros armónicos, dependiendo de la elección de la resistencia en los cálculos
- ✓ No requieren ser divididas en ramas paralelas para mitigación de los armónicos.
- ✓ Frente a problemas de pérdidas en la sintonía, es robusto en comparación con los filtros sintonizados simples.

Desventajas.

- ✓ Ocasiona una resonancia paralela cuando se conecta al sistema eléctrico.
- ✓ Las pérdidas son mayores en la resistencia del filtro y en el diseño del inductor.
- ✓ Los filtros amortiguados o pasa altos requieren una mayor potencia reactiva en su diseño constructivo.

2.7 TESIS DE INVESTIGACIÓN SIMILARES AL PRESENTE ESTUDIO DE TESIS.

Se indica cuatro proyectos de tesis las cuales consideramos que tienen una similitud con respecto al presente proyecto elaborado, de los cuales se mencionan sus conclusiones y hacemos una comparación, para ver los objetivos que se tiene en común.

2.7.1 Tesis Pregrado 1: “Implementación de un filtro pasivo para compensación armónica y corrección del factor de potencia” [12]

Conclusiones: “La estrategia de compensación a través de filtros pasivos es una buena solución para disminuir la distorsión armónica, en aquellos casos donde el THDv excede su nivel gracias a que ciertos armónicos presentan mayor nivel que otros en específico y este nivel sea cercano al límite permitido; para redes donde los niveles de THD estén muy por encima de la norma se recomienda implementar otra estrategia de compensación.

Además de disminuir el contenido armónico también fue posible incluir un banco de capacitores en el diseño, que incidió notoriamente al mejoramiento en el factor de potencia, donde la potencia reactiva necesaria para tal mejoramiento es la base en este caso para el diseño del filtro.

Una de las principales pautas de diseño se basa en tratar que las resonancias pico del sistema se encuentren alejadas de la frecuencia fundamental o que estén a frecuencias cuyo orden armónico no es inyectado por las cargas no lineales conectadas a la red, evitando con esto problemas de sobretensiones y sobrecorrientes que afecten por ejemplo el aislamiento sólido de los cables, las bobinas de las máquinas, envejecimiento en el capacitor del filtro, entre otros” [12]

Comentario 1. A través de las conclusiones que llegaron de acuerdo al tema anterior se comprueba que para mejorar la mala calidad de energía en especial el de armónicos y potencia reactiva se diseñó filtros armónicos y se instalaron condensadores trifásicos. Con respecto a nuestro caso de estudio el cual también tenemos similares objetivos, deducimos que nuestra hipótesis planteada al inicio del estudio estaría siendo reforzada por las

conclusiones que se indican, con respecto a la eliminación de los armónicos y la mejora considerable del factor de potencia que se logró mediante la inserción de banco de condensadores.

2.7.2 Tesis Pregrado 2: “Diseño y construcción de un kit de filtros pasivos para la mitigación de corrientes armónicas” [13]

Conclusiones. “En primer lugar es importante resaltar que se ha cumplido con el objetivo propuesto a desarrollar en este proyecto de grado, diseñar y construir un kit didáctico de filtros pasivos, que aporten al entendimiento de soluciones para la mitigación de corrientes armónicas.

El proceso de conceptualización, diseño y construcción fue exitoso, pues si se observa la Figura 24. Se puede apreciar el comportamiento en frecuencia, a la frecuencia de resonancia, se crea una camino de baja impedancia y atrapa las corrientes que no se desea que fluyan hacia a la red de distribución.

Con respecto al funcionamiento real del filtro se logró el objetivo que era reducir el contenido armónico generado por un variador de velocidad en un rango considerable, lo que da como resultado un mejor aprovechamiento de la energía y protección a los motores conectados” [13]

Comentario 2. Del tema anterior deducimos que, mediante el diseño y la elaboración de un kit de filtros pasivos diseñados adecuadamente se logra eliminar los armónicos de corrientes perjudiciales que son generados a causa de la utilización de variadores de velocidad en gran medida, por lo tanto, con respecto a nuestro caso de estudio que tenemos el mismo objetivo que este tema, estaríamos reforzando nuestra hipótesis planteada que es el de mitigar o eliminar un armónico en especial el de orden quinto mediante el diseño adecuado de filtros armónicos.

2.7.3 Tesis Pregrado 3. “Metodología para el análisis de propagación y filtrado de armónicas en un sistema eléctrico” [14]

Conclusiones. “La inserción de cargas no lineales produce corrientes y tensiones de frecuencia diferente a la del diseño del sistema eléctrico (60 Hz), los cuales fluyen a través de la red eléctrica afectando a dispositivos y equipo que no fueron diseñados para operar en condiciones diferentes a la del sistema.

Las sobretensiones o atenuaciones de la tensión producidas por la presencia de armónicas causan en muchas ocasiones daño a los equipos conectados al sistema, y mal funcionamiento de las protecciones. Por ello es necesario utilizar herramientas computacionales que ayuden a predecir el comportamiento del sistema eléctrico en presencia de armónicas y los efectos que se puedan producir en los dispositivos que se encuentren conectados al sistema.

Utilizando los sistemas de prueba de 6 y 16 nodos del IEEE, y el equivalente del sistema de transmisión de la división sureste de la CFE como casos de estudio, los cuales contienen cargas que inyectan corrientes armónicas al sistema eléctrico y realizando la implementación de los filtros armónicos sintonizados serie RLC se logró reducir la distorsión armónica total de tensión (THD) en los nodos que no cumplían con los valores recomendados en la norma IEEE 519-1992 ; teniendo un resultado satisfactorio al diseñar e incluir los filtros pasivos sintonizados en los nodos afectados por las armónicas” [14]

Comentario 3. La tesis de pregrado mencionado anteriormente hace un estudio de la calidad de energía, en especial importancia a los armónicos en un punto de conexión común, que mediante mediciones realizadas se obtuvo armónicos de tensión de diferentes órdenes, pero en mayor cantidad los de orden 3, 5, 7, de los cuales plantean como alternativa de solución el diseño y la instalación en campo de filtros pasivos o denominados sintonizados, y que a través de la instalación de filtros logran disminuir las cantidades armónicas a niveles considerables, por lo que nuestro caso de estudio estaría siendo

reforzada por el presente estudio de tesis, ya que consideran como una alternativa de solución. Técnicamente viable el de insertar Filtros Sintonizados en el punto de conexión común de un sistemas eléctricos.

2.7.4 Tesis Pregrado 4. “Análisis de Distorsión Armónica en Redes de Distribución de Energía Eléctrica utilizando Matlab” [15]

Conclusiones. “La distorsión armónica afecta seriamente la operación de sistemas eléctricos de potencia ya que introduce perdidas adicionales a los componentes de la red, disminuyendo la eficiencia de los sistemas y provocando la mala operación de equipos y protecciones.

Los efectos que provocan los armónicos sobre los sistemas de distribución de energía eléctrica son sobreesfuerzos del aislamiento, sobreesfuerzos térmicos, Interferencia Inductiva y disrupción, por lo que es de suma importancia el determinar la presencia de armónicos en la red.

Los Filtros pasivos en paralelo son circuitos muy populares en el control de la propagación de corrientes armónicas y normalmente son designados como una serie de combinaciones de reactores y capacitores” [15]

Comentario 4. En este proyecto de tesis de pregrado, el autor hace referencias a los diferentes problemas ocasionados a consecuencia de los armónicos, ya sea la quema de equipos eléctricos, las pérdidas de aislamiento en un sistema eléctrico, la falla de operatividad de los equipos de protección, además plantea como método de solución implementar un filtro pasivo, ya que es de mayor empleo en las industrias por su efectividad para mitigar armónicos impares menores.

2.8 ESTADO DE ARTE DE LA CALIDAD DE PRODUCTO FRENTE A LOS ARMÓNICOS.

Los efectos que se manifiestan como unas señales distorsionantes en las formas de onda de tensiones y corrientes, son una muestra clara de la existencia de armónicos en una instalación eléctrica de baja, media tensión o alta tensión, debido a tales efectos perjudiciales, y a medida que va avanzando la tecnología, se fueron desarrollando métodos de solución, conocidos como filtros armónicos, entre ellos los filtros pasivos que son diseñados convenientemente para mitigar un orden específico de armónico, en conformidad con la (NTCSE) y las normas internacionales como la IEEE 1159: 2002. Puesto que es necesario la inserción de dichos filtros, por motivos de, resarcimiento de mala calidad, compensación de energía reactiva, evitar daños a equipos eléctricos en una instalación eléctrica, y sobre todo mejorar la calidad de vida de los consumidores.

CAPITULO 3

METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

3.1 DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN.

Para desarrollar el presente estudio de tesis, se sigue una metodología de análisis cualitativo, puesto que el campo de aplicación está orientado a, evaluar casos específicos y no en generalizar sus resultados, se fundamentará en diferentes estudios relacionados con el tema entre los cuales podrán ser citados diferentes, revistar técnicas especializadas, Libros, Normas, tesis semejantes, proveedores de filtros y condensadores, así como la experiencia obtenida en las instalaciones de analizadores de redes trifásicos y su respectivo análisis de armónicos, y en las recomendaciones brindados por la (NTCSE), así como la (IEEE 1159)

Debido a que en esta investigación lo que se persigue es analizar y solucionar los efectos ocasionados por los armónicos de tensión y corriente que se producen a consecuencia del uso de cargas no lineales en los sistemas eléctricos de baja y media tensión, se puede decir que se enmarca en una investigación a nivel analítico, puesto que a través de los resultado obtenidos por los equipos de medición, se proceden a realizar un estudio analítico con el único objetivo de minimizar o eliminar los armónicos existentes en las redes eléctricas, tomando las decisiones correctas ante la existencia de los mismos, así mismo la presente investigación es considerada del tipo tecnológico, porque se vincula con

Normas técnicas internacionales y procedimientos, con el objetivo de validar procedimientos.

3.2 POBLACIÓN Y MUESTRA

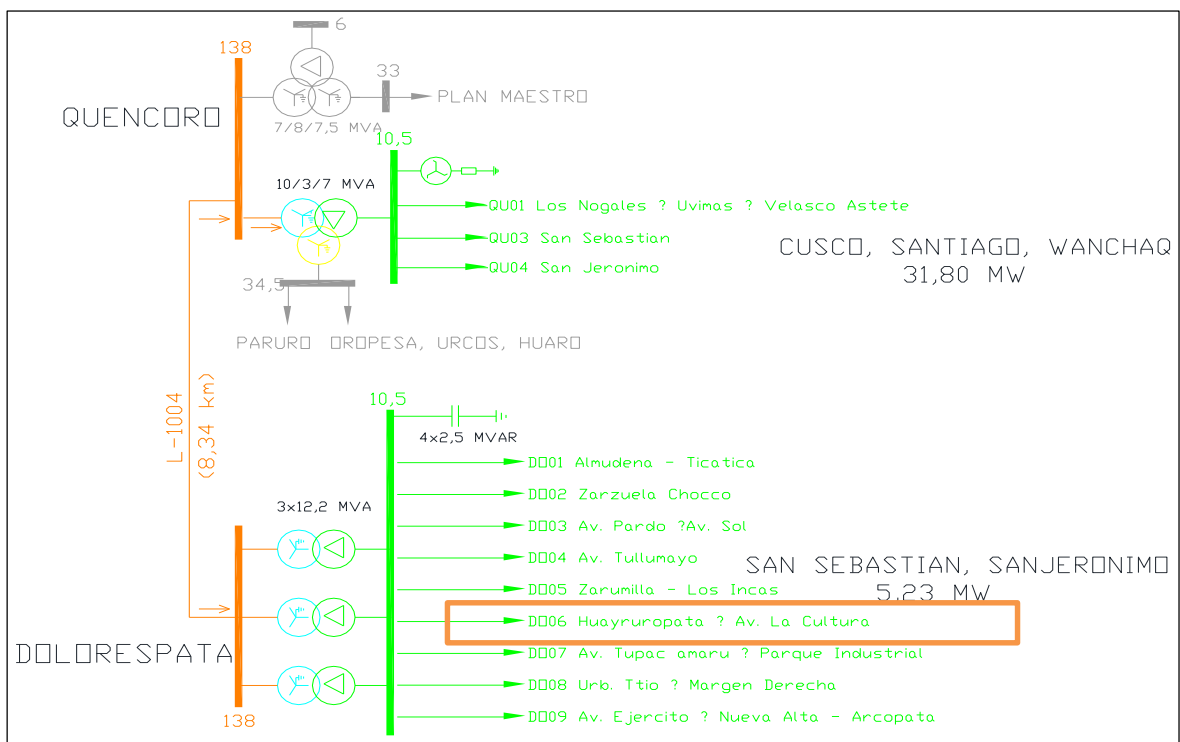
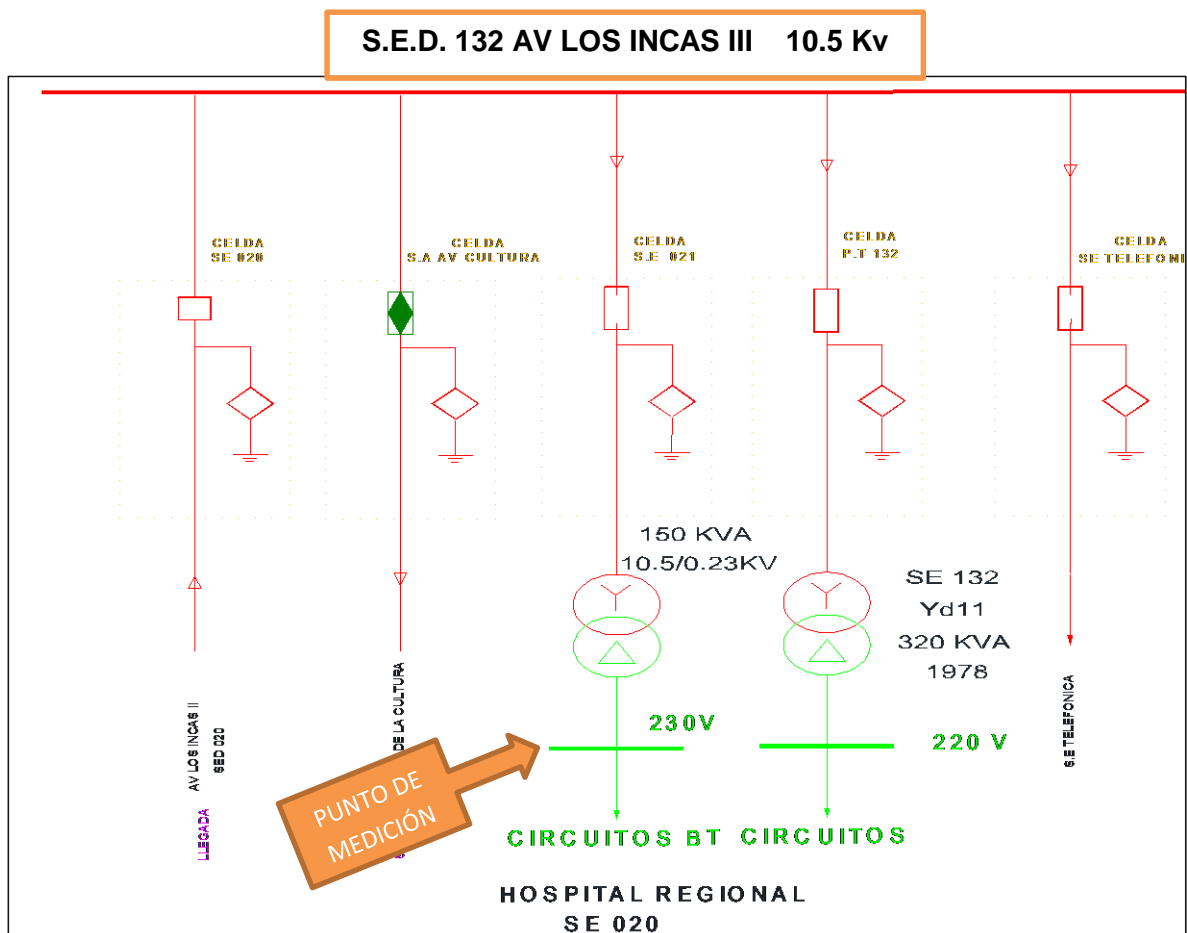
3.2.1 Población: Los Clientes Mayores pertenecientes al circuito N° 06 de la sub estación DOLORESPATA (DO06) de la localidad de Cusco, donde es necesario corregir la calidad de producto en especial lo referente a los armónicos, eliminando o disminuyendo a niveles aceptables por las normativas vigentes, el ámbito del alcance de la investigación: concesión de la empresa de Electro Sur Este S.A.A.

Ítem	Suministro	Cliente	Dirección	F. de medición
1	0010719743	Consorcio Orión Cusco	Mz E Lt 7 Int 1 Ur Parque Industrial, cusco	Ago 2017
2	0010713772	Hogar Clínica San Juan de Dios	Av. Manzanares N° 264 Urb. Manuel Prado Cusco - Perú	May 2017
3	0010017629	Hospital Regional Cusco	Av. Dela Cultura Ur Manuel Prado	Mar 2017
4	0010017368	Clínica San José	Av. los Incas 1414, Cusco	Ene 2017
5	0010001171	UNSAAC- SED Entrada	Av. de La Cultura 773, Cusco.	May 2016
6	0010001131	UNSAAC- SED Comedor	Av. de La Cultura 773, Cusco.	Nov 2016
7	0010713742	Centro medico de Salud PARDO	Av. de la Cultura N° 710	May 2017

Tabla N° 21 Población a considerar para el presente estudio.

Fuente. Elaboración propia

3.2.2 Muestra: Se toma como muestra a la medición realizada en el tablero de distribución secundaria (TDS) a la salida del transformador de distribución de las instalaciones del HOSPITAL REGIONAL DE CUSCO. Con código de suministro N° 0010017629- ELSE. S.A.A. pertenecientes al alimentador, (DO06) de la Subestación DOLORESPATA, ubicado en la Av. La cultura Urb. Manuel Prado, en el Distrito de Wanchaq de la Localidad de Cusco, tal como se indica en la siguiente figura.



En la figura anterior se muestra el diagrama unifilar de la SED 132. AV LOS INCAS III, donde existe un circuito derivado para alimentar al Hospital Regional de Cusco, mediante un transformador de potencia de 150KVA, con una tensión de línea en el lado secundario de 230Vac, en dicho punto es donde se realizó la medición para evaluar los parámetros eléctricos, entre ellos los armónicos de tensión.

Para tomar dicha muestra de medición, se procede revisar el correcto funcionamiento de los elementos del equipo de medida, tanto como las pinzas de corriente y los cables de tensión, además es necesario verificar el tipo de sistema eléctrico existente en la instalación, para poder configurar convenientemente del equipo analizador de redes trifásicos de la Marca UNILYZER 902, y realizar las conexiones, tal como lo indica en la siguiente figura de conexiones pertenecientes al equipo UNILYZER 902.

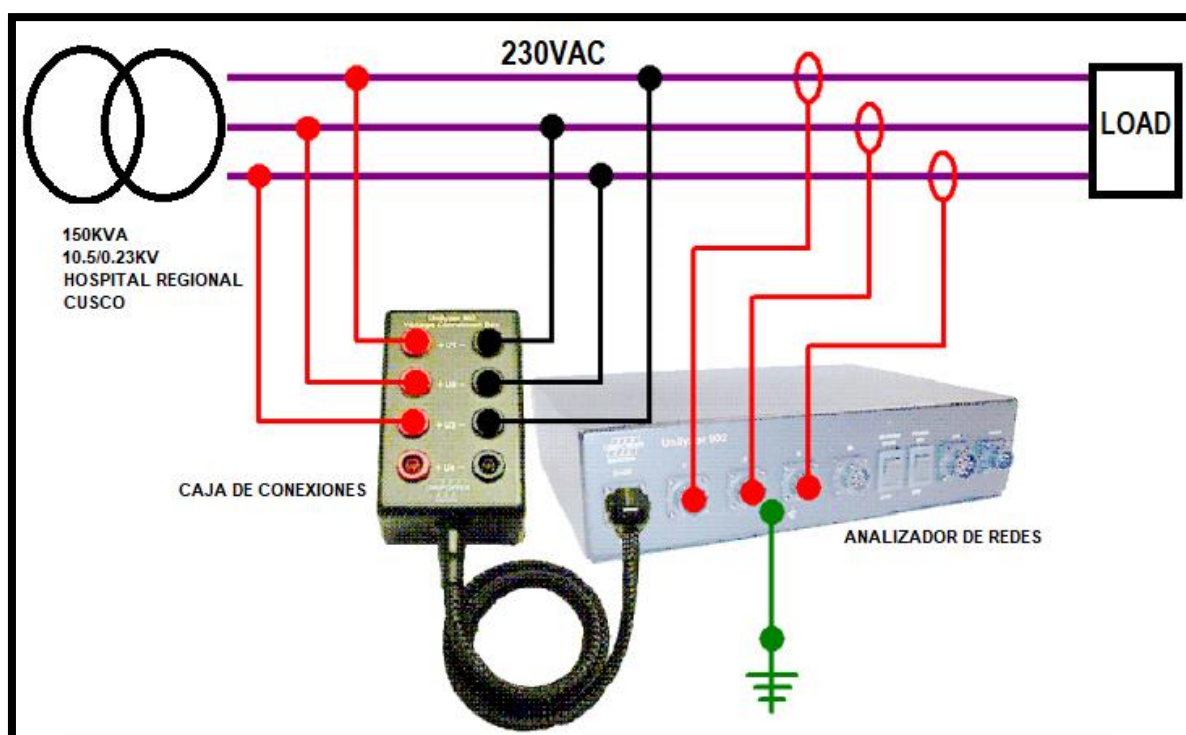


Figura N° 25. Diagrama de conexión del equipo analizador de redes trifásico
Fuente. Elaboración propia.

El Equipo Analizador de Redes Trifásicos de la Marca UNILYZER 902, Registra todos los valores configurados según requerimiento, los datos son descargado del equipo y

exportados en formato de texto “.txt”, el cual en este mismo formato de texto es útil para Reportar las Mediciones al Organismo Supervisor Osinergmin, Adicional al reporte enviado por Norma Técnica, el formato de texto “.txt” descargado del Equipo, es convertible en formato de Excel “.xls”, el cual sirve para poder Estudiar y Analizar de manera más detallada el comportamiento de cada parámetro eléctrico, para el presente caso de estudio se analiza los Armónicos de tensión existentes en dicho punto de medición.

3.3 TÉCNICAS DE RECOLECCIÓN DE DATOS.

Para el siguiente paso que consiste en recolección de datos requeridos para elaborar el presente estudio se tienen las siguientes consideraciones:

1. Presentar una solicitud de manera formal al acceso de las instalaciones internas de la empresa donde se requiere realizar la medición.
2. Información de la ingeniería de detalle de la ubicación del tablero de distribución y el transformador de distribución.
3. Realizar una inspección visual de las condiciones ambientales y de operación del sistema, afín de determinar las dimensiones y características de la instalación.
4. Reconocimiento del sistemas eléctrico, tanto como para determinar el tipo y los niveles de tensión.
5. Identificación de los riesgos y peligros, el especialista de las instalaciones tiene que contar con sus implementos de seguridad necesarios (EPP).
6. Realizar una medición simple, para determinar la secuencia de fases del sistema eléctrico en la salida (BT) del transformador.
7. Se tiene que revisar el correcto funcionamiento del equipo analizador de redes, tanto su estado operativo como normativo.
8. Programar el equipo analizador de redes trifásico (UNILYZER 902), con los parámetros requeridos y dejar instalado correctamente por un periodo considerable que garantice el análisis de los datos.

3.4. TÉCNICAS PARA EL PROCESAMIENTO Y ANÁLISIS DE DATOS

1. Se realizará una inspección y verificación de la existencia de datos registrados en el equipo analizador antes de ser desinstalado, para luego ser leídos por el software instalado correctamente en el computador, software (UNIPower PQ Secure) que pertenecen al mismo equipo.
2. Descargando los datos validos registrados por el equipo analizador de redes en la computadora se verifica los niveles de distorsión obtenidos, para luego ser comparados con los límites establecidos en las normativas vigentes.
3. Si en los datos leídos por el software se observa la existencia de corrientes de secuencia cero o un desbalance de las tensiones, se puede tomar otras medidas inmediatas como la mejora de los sistemas de puesta a tierra (PAT), o el sobredimensionamiento de conductores neutros.
4. Si en los datos registrados se observa la existencia de armónicos fuera de las tolerancias establecidas se procede a tomar decisiones dependiendo del grado de complejidad acciones correctivas como, inserción de filtros armónicos con sus respectivas componentes reactivas.
5. De requerir realizar el diseño de filtros armónicos, se consideran los siguientes aspectos.
 - ♦ Recomendaciones para el diseño de filtros armónicos, establecidas por las Diferentes Normas Internacionales, IEEE 1159- 1992, y revistas técnicas Reconocidas.
 - ♦ La necesidad de contar con una o más filtros armónicos, evaluándose alternativas de disposición la cual genere el menor impacto en las instalaciones eléctricas, Teniendo en consideración aspectos de Accesibilidad, Mantenibilidad y Operatividad.

6. Mediante un diseño adecuado de los Filtros Armónicos Pasivos, se requiere realizar una remediación para comprobar los niveles de armónicos disminuidos, y descartar el impacto que ocasionó a los usuarios.

CAPITULO 4

ANÁLISIS DE LA INVESTIGACIÓN.

En el presente capítulo se analiza los criterios de diseño de un filtro armónico basados en recomendaciones Nacionales como la Norma Técnica de Calidad de los Servicios Eléctricos (NTCSE) y las Normas Internacionales IEEE 1159-1992, IEEE 18-2002. Utilizados para el diseño de filtros armónicos con fines de reducción de los niveles de armónicos existentes en el lugar donde se desea mitigar la mala calidad de producto, o sea en un (PAC), Para efectos demostrativos se diseña el filtro armónico en base a datos obtenidos de mediciones realizadas en el HOSPITAL REGIONAL DE CUSCO, de la localidad de Cusco, del departamento de Cusco. Para lo cual se requiere evaluar los riesgos y determinar la necesidad de contar con un filtro Pasivo conectado en paralelo, considerando las características técnicas de las cargas que alimenta y las características del lugar, para el cual es diseñado.

Requisitos para el diseño de la investigación.

- ✓ Disposición geográfica de la instalación.
- ✓ Disponibilidad de un equipo analizador de redes trifásicas Homologado por Osinergmin y calibrado por una entidad competente.
- ✓ Accesibilidad al software para la comprobación de resultados.
- ✓ Comprobar que los niveles de tensión y corriente armónicos estén fuera de los niveles indicados por las normativas referentes a armónicos.

4.1 VALIDACIÓN DE DATOS.

La validación de datos fue realizado con el objetivo de corroborar la existencia y la cantidad de datos a examinar así como las potencias registradas, el factor de potencia y los niveles de THD totales, tanto como de tensión y corriente existentes en el punto donde se dejó instalado el equipo analizador, de los registros obtenidos se verifico que existen 1157 muestras validas que fueron tomadas durante el periodo de instalación que empieza a las 11:40:00 h, del 24 de Marzo del 2017 hasta el 01 de Abril del 2017, con un intervalo de medición de 10 minutos. Tales que podemos mostrar en las siguientes gráficas.

a). Tensión. En la figura N° 22 se muestra las variaciones del nivel de tensión en la parte secundaria del transformador, durante el periodo de medición que está comprendida entre el 24 de marzo al 1 de abril del 2017, con un intervalo de medición de 15 min, se, observa que presenta una tensión promedio de 235.347 voltios, alcanzando una tensión máxima de 240.395 voltios y una mínima de 230.231 voltios. De los registros obtenidos se puede apreciar que presenta una ligera variación con respecto a los valores nominales.

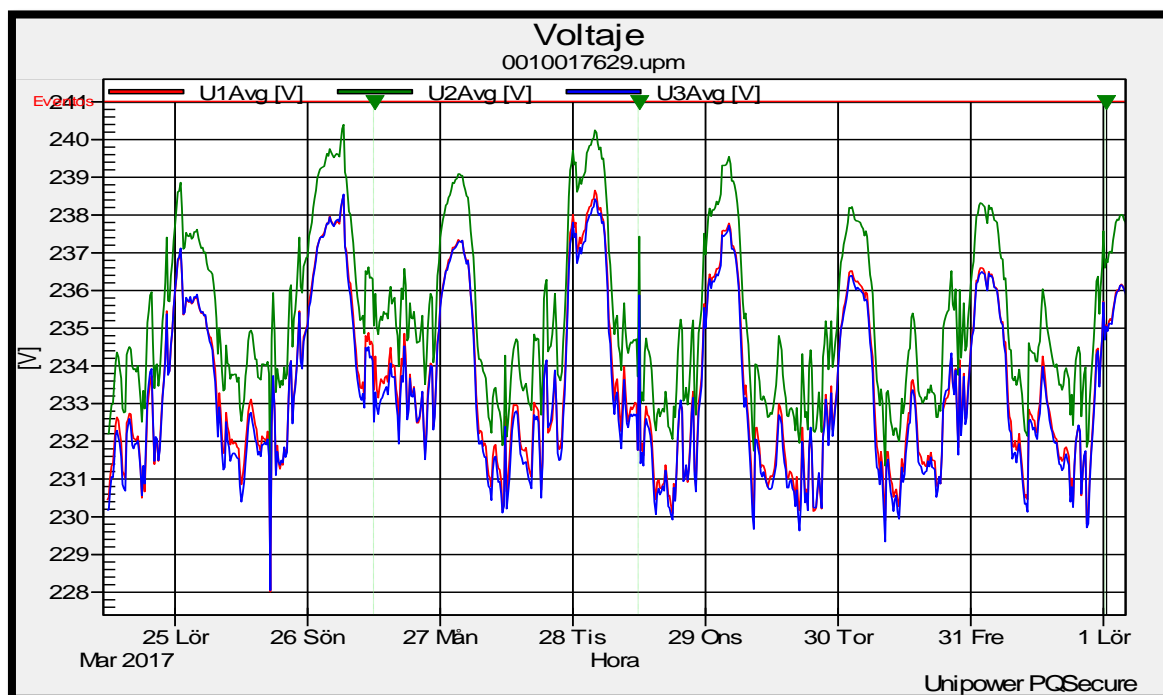


Figura N° 26. Figura de validación de datos de tensión Registrados por el equipo UNILYZER durante el periodo de Prueba.
Fuente. Elaboración propia en base software UNIPOWER PQsecure.

Valores	Fase R	Fase S	Fase T	Desbalance (%)		
				R	S	T
Máximo	238.652	240.395	238.549	-0.228	0.497	-0.272
Promedio	233.535	235.347	233.363	-0.234	0.537	-0.308
Mínimo	228.012	230.231	228.053	-0.330	0.636	-0.312

Tabla N° 22. Valores de tensión, máximo promedio y mínimo y desbalance de las fases R, S, T.
Fuente. Elaboración propia en base a mediciones con equipo Unilyzer 902.

b). Corriente. En la siguiente figura N° 27 se muestra las variaciones de corriente promedio, durante el periodo de medición, donde se puede apreciar un comportamiento variable durante todo el periodo que consiste la medición, donde el máximo valor de corriente registrado por el equipo analizador de redes es 63.781 Amperios ocurridos en la fase “S”, el mismo que tuvo lugar el día 30 de marzo de 2017 a las 11:00 horas, adicionalmente se puede apreciar que existe una considerable disminución en el nivel de corriente que desciende hasta un valor mínimo de 14.189 Amperios ocurrido el 1 de abril de 2017 a las 06:15 horas, tal como se puede apreciar en la siguiente figura.

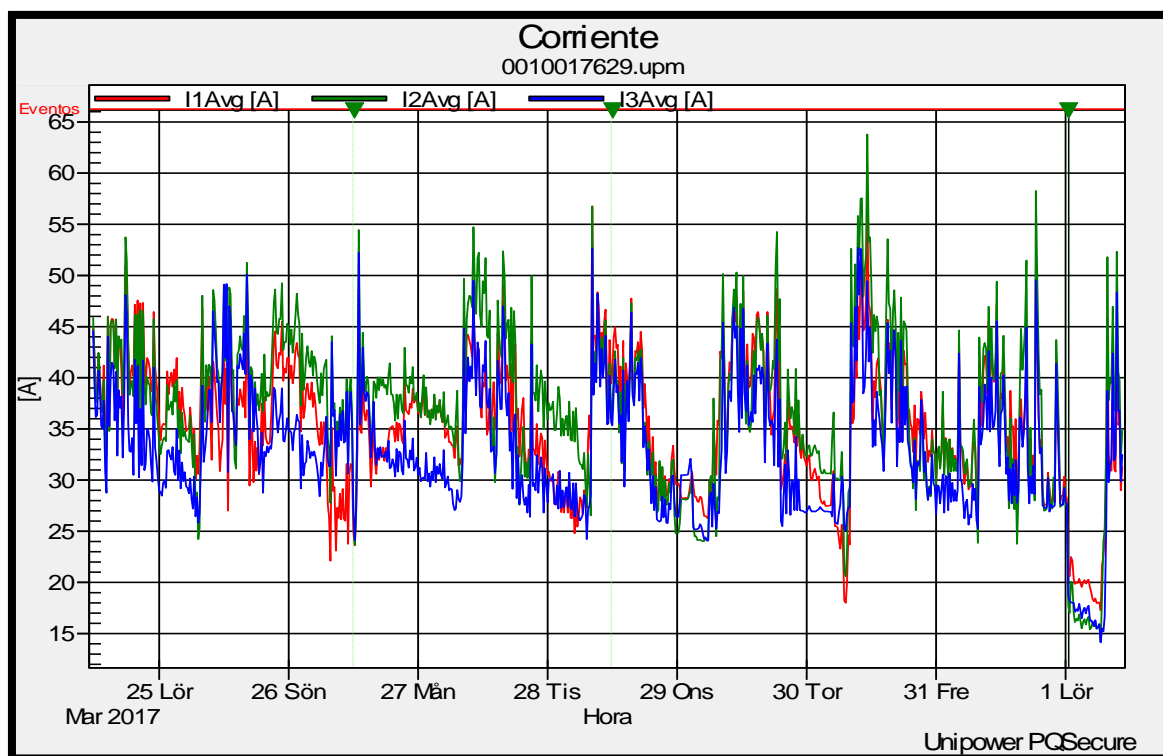


Figura N° 27. Niveles de corriente promedio, Registrados por el equipo UNILYZER durante el periodo de Prueba.
Fuente. Elaboración propia en base software UNIPOWER PQsecure

Valores	Fase R	Fase S	Fase T	Promedio (A)
Maximo	56.757	63.781	52.703	57.747
Promedio	35.313	36.901	32.930	35.048
Minimo	17.253	14.189	14.142	15.194

Tabla N° 23. Valores de corriente, máximo promedio y mínimo de las fases R, S, T.
Fuente. Elaboración propia.

c). Potencia. De los registros obtenidos por el equipo analizador de redes trifásico de la marca UNILYZER 902 con respecto a los niveles de potencia se registraron los datos que se indican en la figura N° 26, donde se puede apreciar que presenta un comportamiento variable durante el periodo de medición, registrando un valor de demanda promedio 12.193Kw, adicional se observa que la máxima demanda registrada fue de 19.669kW, el mismo que tuvo lugar el 30 de marzo de 2017 a las 11:10 horas, tal como se muestra en la siguiente figura.

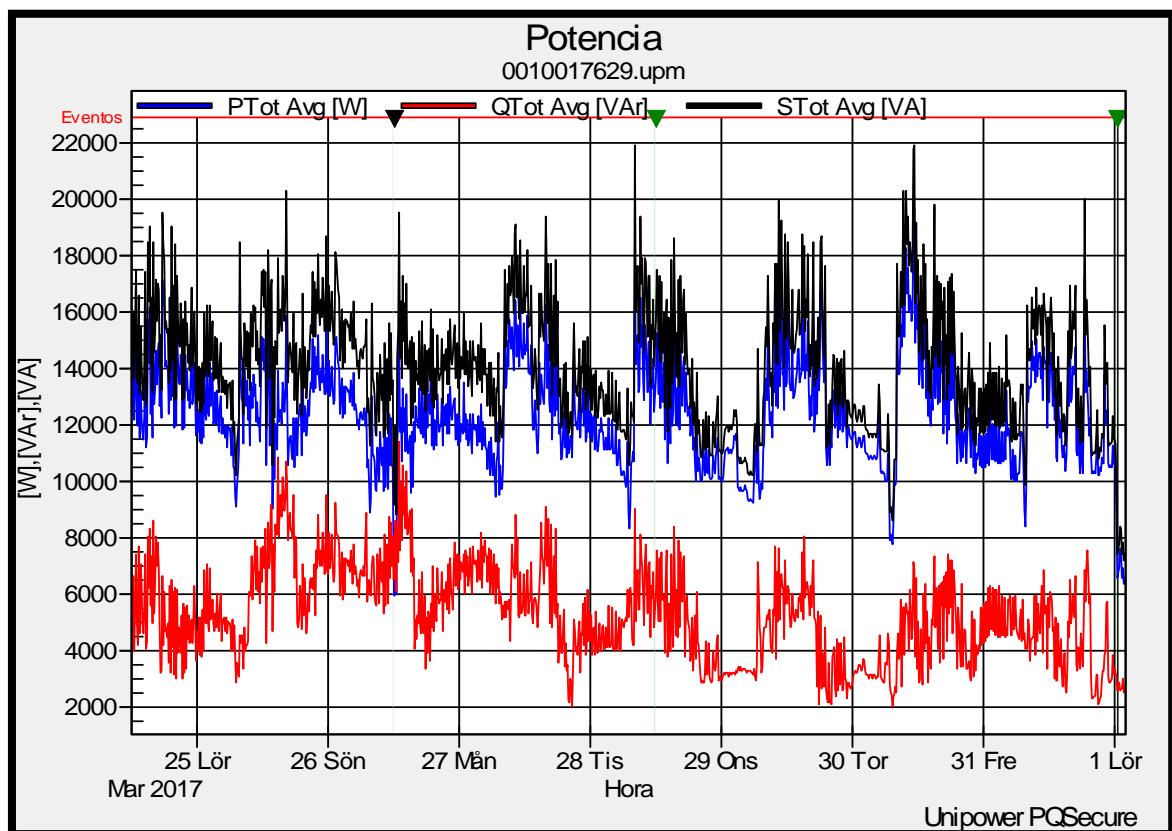


Figura N° 28. Figura de validación de datos de Potencias, Registrados por el equipo UNILYZER durante el periodo de Prueba.
Fuente. Elaboración propia en base software UNIPOWER PQsecure.

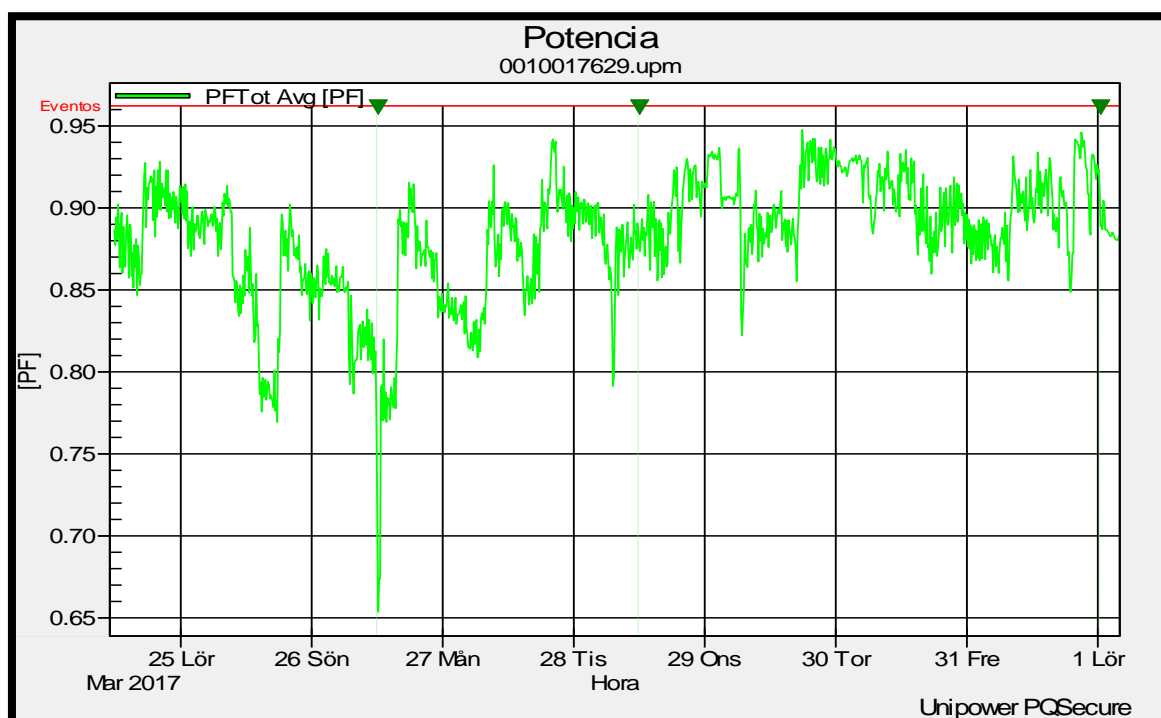


Figura N° 29. Validación de datos de Factor de Potencia.
Fuente. Elaboración propia en base software UNIPOWER PQsecure.

VALORES	P(kW)	Q(kVAR)	S(Kva)	F.D.P.
Maximo	19.669	11.409	21.909	0.947
Promedio	12.193	5.173	13.881	0.883
Minimo	5.529	2.029	6.229	0.653

Tabla N° 24. Valores de potencias obtenidos.
Fuente. Elaboración propia

d). Armónico. Los armónicos THD registrados (3.9199 %) de acuerdo a la figura cumple con los valores establecidos en la (NTCSE) (8%) y el de la IEEE- 519 (5%), para el caso de los armónicos individuales de tensión y corriente, si bien es cierto que los THD no sobrepasan los valores totales, no significa que en un armónico individual se encuentre dentro de la Norma.

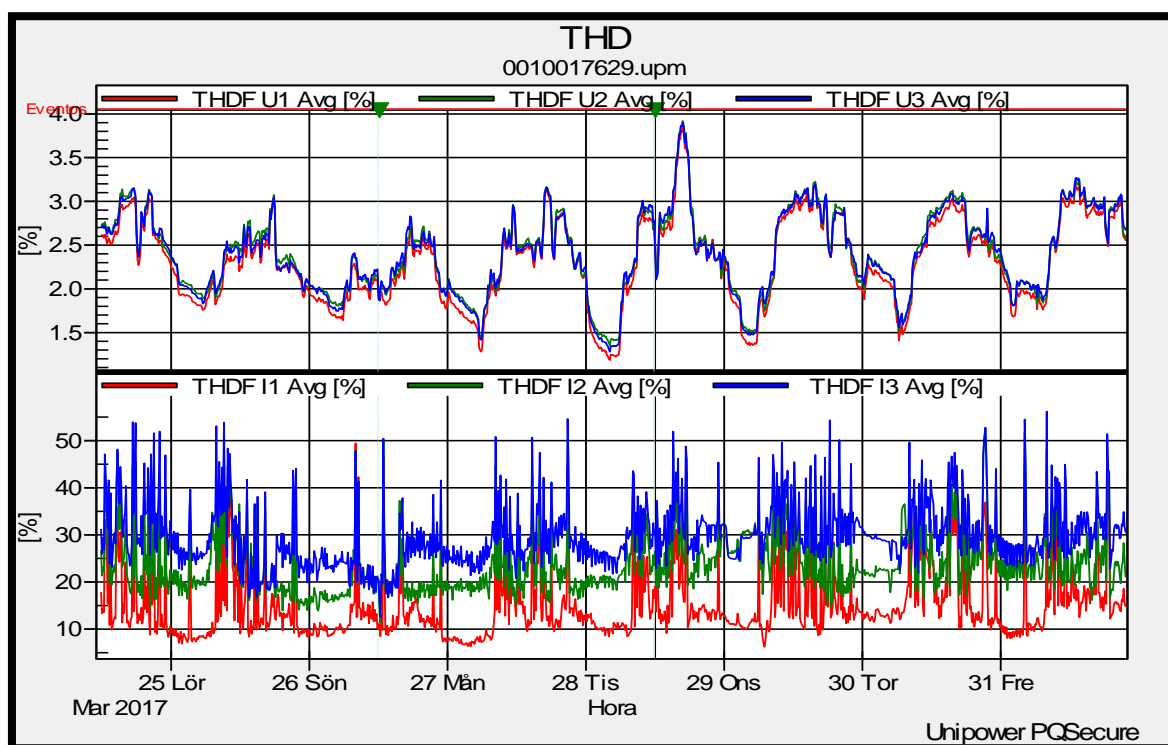


Figura N° 30. Validación de datos de THD de tensión y de corriente Registrados por el equipo UNILYZER
Fuente. Elaboración propia en base software UNIPower PQsecure.

4.2 ANÁLISIS PRELIMINAR DE DATOS DE ARMÓNICOS.

4.2.1 Análisis de los Armónicos Totales THD.

Para iniciar un análisis preliminar con los registros obtenidos en el periodo de medición, seleccionamos los armónicos con el fin de determinar la cantidad total de armónicos existentes que fueron registrados durante el periodo de medición, haciendo mención a los máximos valores, mínimos y promedios de THD hasta el orden 50, donde se puede apreciar una valor máximo en la fase S de 3.9199 %, sin embargo, se encuentra dentro de la (N.T.C.S.E.), (8%) el mismo que tuvo lugar el día 28 de marzo de 2017 a las 16:40 horas, para el siguiente cuadro se muestra los valores registrados durante el periodo de medición.

	THDv (Distorsión Armónica de Tensión Total)		
	Fase R	Fase S	Fase T
Máximo. (%)	3.8399	3.9199	3.9049
Mínimo. (%)	1.1849	1.3549	1.2799
Promedio. (%)	2.3014	2.3960	2.3888

Tabla N° 25 Valores de THDv Total registrados durante el periodo de prueba.

Fuente. Elaboración propia en base a los registros obtenidos por el equipo UNILYZER 902.

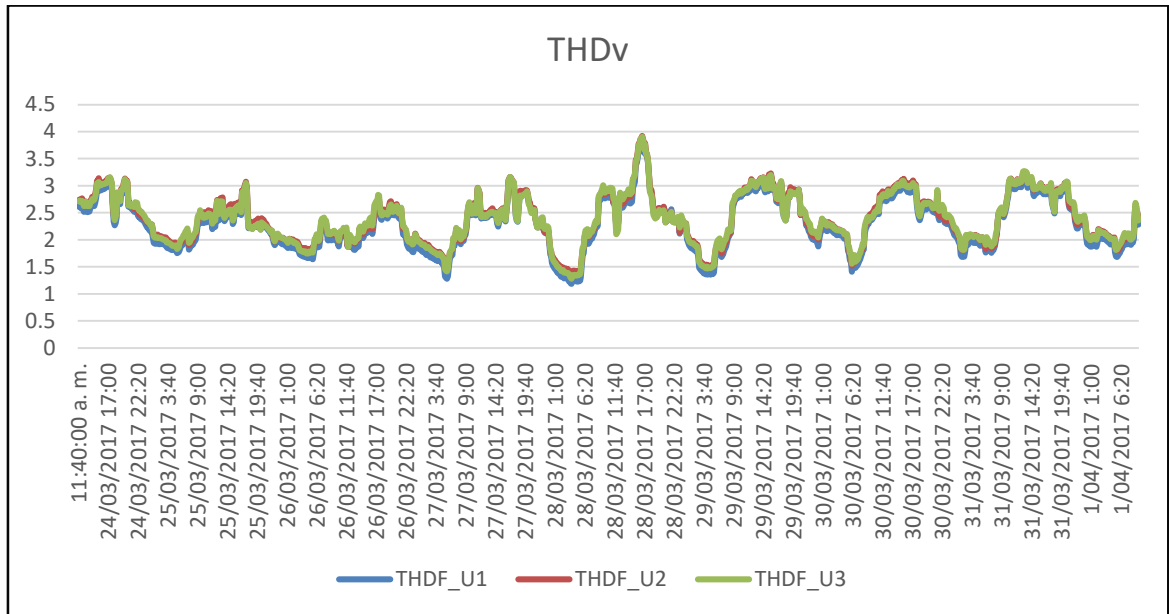


Figura N° 31 Niveles de THDv Registrados en el periodo de prueba desde el 24 de Marzo al 01 de abril del 2017.
Fuente. Elaboración propia en xls.

	THDi (Distorsión Armónica de Corriente Total)		
	Fase R	Fase S	Fase T
Máximo. (%)	50.2849	52.3999	57.3349
Mínimo. (%)	6.2399	10.7699	12.5449
Promedio. (%)	15.2846	23.8351	29.8230

Tabla N° 26. Valores de THDi Total registrados durante el periodo de prueba.
Fuente. Elaboración propia

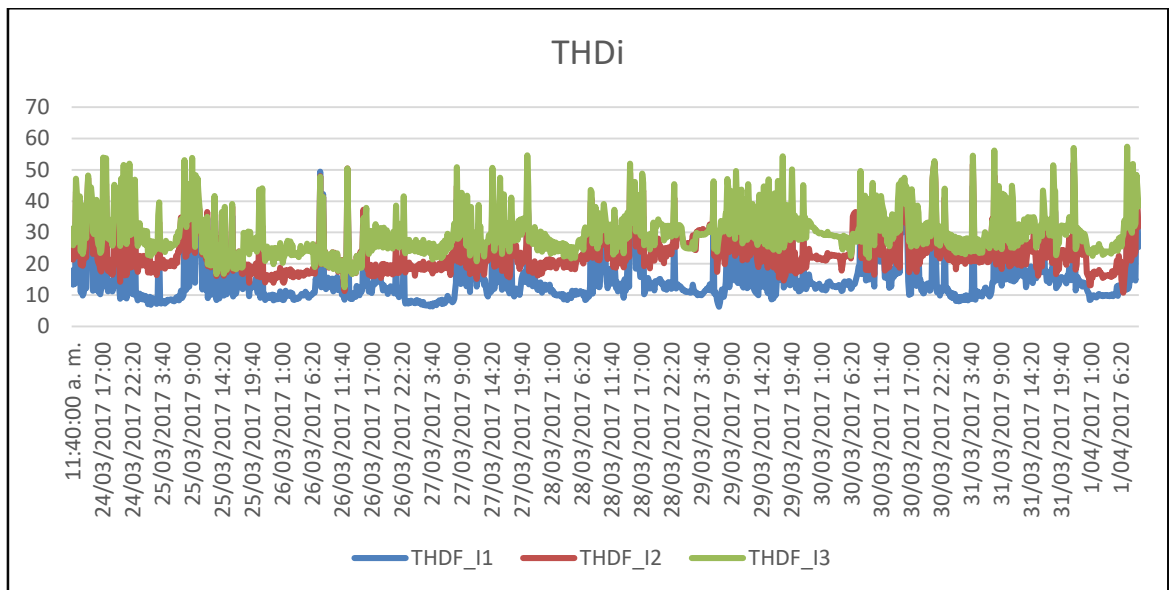


Figura N° 32 Niveles THDi Registrados en el periodo de prueba desde el 24 de Marzo al 01 de abril del 2017.
Fuente. Elaboración propia en xls.

4.2.2 Análisis de los Armónicos Individuales THDv.

Para el siguiente punto del presente estudio procedemos a evaluar los mayores niveles de armónicos registrados durante el periodo de instalación del equipo analizador de redes UNILYZER 902, de tal manera que se pudo observar valores de THDv, y THDi, seleccionadas de acuerdo al orden de los armónicos, del mismo modo se aprecia que existen niveles altos de armónicos, el mismo que tuvo lugar el 28/03/2017 a horas 16:40:00 h, también se observa que existen valores que pasan las tolerancias que se indican en la (NTCSE).

Niveles de THDv Registrados											
Armónicos (h)	1	3	5	7	9	11	13	15	17	19	21
Fase A (%)	100	0.290	8.690	1.617	0.00	0.435	0.373	0.00	0.124	0.103	0.00
Fase B (%)	100	0.477	8.898	1.846	0.021	0.435	0.601	0.124	0.207	0.145	0.021
Fase C (%)	100	0.394	8.815	1.742	0.021	0.477	0.477	0.021	0.186	0.124	0.00

Tabla N° 27 Valores de THDv Individuales registrados durante el periodo de prueba.

Fuente. Elaboración propia con datos obtenidos por UNILYZER 902

Niveles de THDi Registrados											
Armónicos (h)	1	3	5	7	9	11	13	15	17	19	21
Fase A (%)	100	0.556	4.535	3.865	0.377	0.188	1.838	0.094	1.319	0.709	0.010
Fase B (%)	100	2.647	6.334	4.717	0.543	0.432	1.712	0.099	1.346	0.754	0.077
Fase C (%)	100	3.346	8.013	5.044	0.989	3.677	2.592	0.943	1.744	1.131	0.188

Tabla N° 28 Valores de THDi Individuales registrados durante el periodo de prueba.

Fuente. Elaboración propia con datos obtenidos por UNILYZER902.

Con base en los registros obtenidos por el equipo analizador y procesados adecuadamente se puede comprobar que el armónico de orden 5 incide considerablemente, para que el nivel de THDv exceda las tolerancias establecidas en la (NTCSE), no solo en un registro, sino, en las tres fases registradas, puesto que es el armónico con mayor nivel presente 8.690 en la fase C, de las medidas realizadas.

Armónicos (Fase A)										
Armónicos (h)	3	5	7	9	11	13	15	17	19	21
Max HDv (%)	0.643	8.690	2.800	0.145	0.933	0.725	0.124	0.248	0.165	0.103
Min HDv (%)	0.041	2.509	0.394	0.00	0.124	0.145	0.00	0.00	0.00	0.00
Pro HDv (%)	0.263	5.093	1.407	0.036	0.483	0.391	0.026	0.089	0.060	0.011

Tabla N° 29 Valores de Armónicos Máximos y Mínimos en la Fase A

Fuente. Elaboración propia con datos obtenidos por UNILYZER 902.

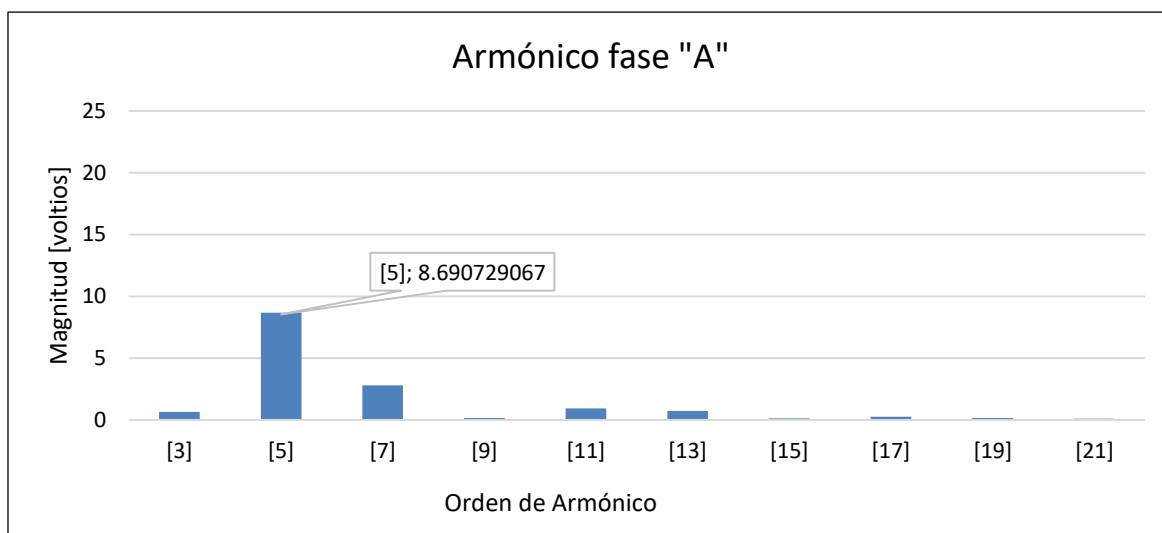


Figura N° 33 Armónico de tensión fase "A" de orden 5.

Fuente. Elaboración propia con datos obtenidos por el UNILYZER 902.

Armónicos (Fase B)										
Armónicos (h)	3	5	7	9	11	13	15	17	19	21
Max HDv (%)	0.891	8.898	2.883	0.165	0.891	0.891	0.186	0.269	0.228	0.103
Min HDv (%)	0.103	2.903	0.477	0.00	0.082	0.269	0.00	0.00	0.00	0.00
Pro HDv (%)	0.406	5.281	1.633	0.075	0.430	0.553	0.112	0.142	0.096	0.021

Tabla N° 30 Valores de Armónicos Máximos y Mínimos en la Fase B

Fuente. Elaboración propia.

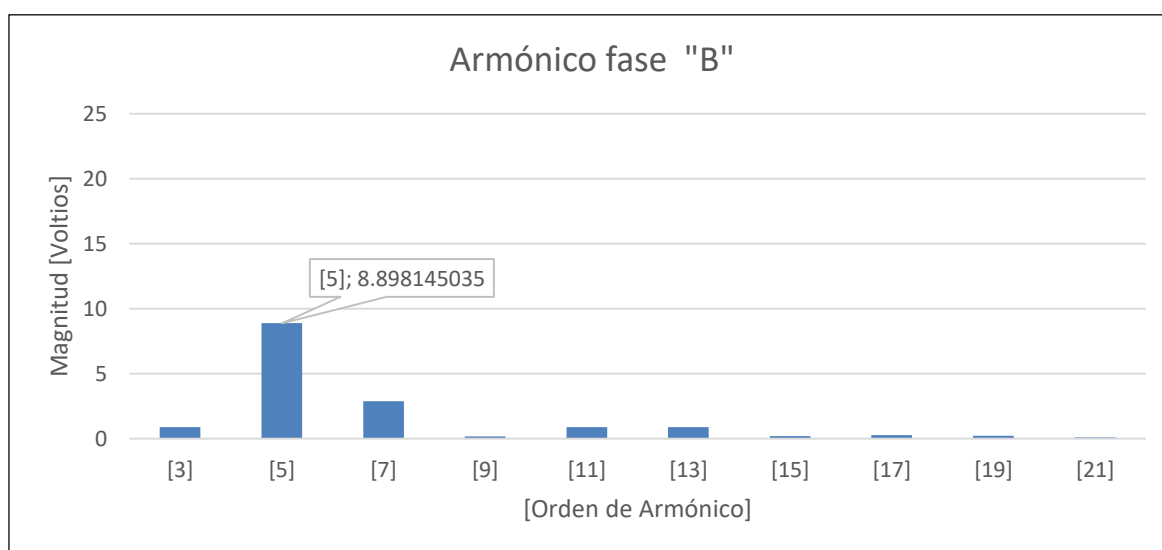


Figura N° 34 Armónico de tensión fase "B" de orden 5.

Fuente. Elaboración propia con datos obtenidos por el UNILYZER 902.

Armónicos (Fase C)										
Armónicos (h)	3	5	7	9	11	13	15	17	19	21
Max HDv (%)	0.642	8.815	2.654	0.165	0.829	0.933	0.062	0.290	0.165	0.062
Min HDv (%)	0.124	2.779	0.311	0.00	0.186	0.186	0.00	0.00	0.00	0.00
Pro HDv (%)	0.340	5.264	1.498	0.043	0.497	0.493	0.002	0.126	0.049	0.001

Tabla N° 31 Valores de Armónicos Máximos y Mínimos en la Fase C

Fuente. Elaboración propia.

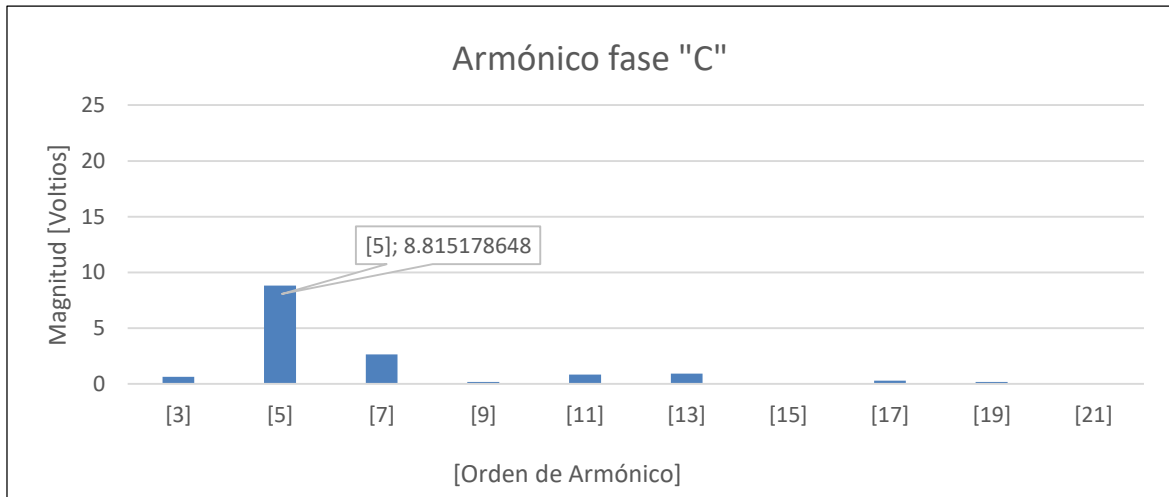


Figura N° 35 Armónico de tensión fase "C" de orden 5.

Fuente. Elaboración propia con datos obtenidos por el UNILYZER 902.

Al evaluar los valores presentados en las tablas anteriores se deduce que, si tomamos acciones correctivas con respecto al 5to armónico estaríamos logrando que los THDv disminuyan considerablemente, puesto que es el armónico con mayor influencia en el punto de medición, para que sus valores excedan sus límites. Con base en lo planteado anteriormente y el objetivo de realizar una compensación por filtrado de armónicos sintonizados, se acomoda a nuestro caso de estudio, ya que es factible diseñar un filtro armónico sintonizado a la 5ta armónica ($5 \times 60\text{Hz} = 300\text{Hz}$), esto con la finalidad de facilitar el camino de los armónicos de orden 5° por medio de una impedancia baja del filtro que se diseña.

A través del software PSCAD se realiza la simulación de una fuente generadora de tensiones armónicas, muy similares a los resultado obtenidos en la medición de armónicos de tensión realizado en el Hospital Regional de Cusco, con la finalidad de observar el comportamiento de la magnitud de armónicos de tensión antes y después de la conexión

del filtro pasivo diseñado, para mitigar el armónico de tensión de 5to orden ($5 \times 60\text{Hz} = 300\text{Hz}$).

Para realizar dicha simulación se considera una fuente de alimentación trifásica de 230Vac a una frecuencia de (60 Hz) y con una resistencia de 0.031 ohmios una impedancia de 0.00113 mH y una capacitancia de 0.00023184F, Que mediante una línea de alimentación muy corta está conectado a una fuente generadora de tensiones armónicas, donde cada fuente armónica está representado por una tensión alterna y frecuencia múltiplo de la fundamental, tal como se muestra en la siguiente figura.

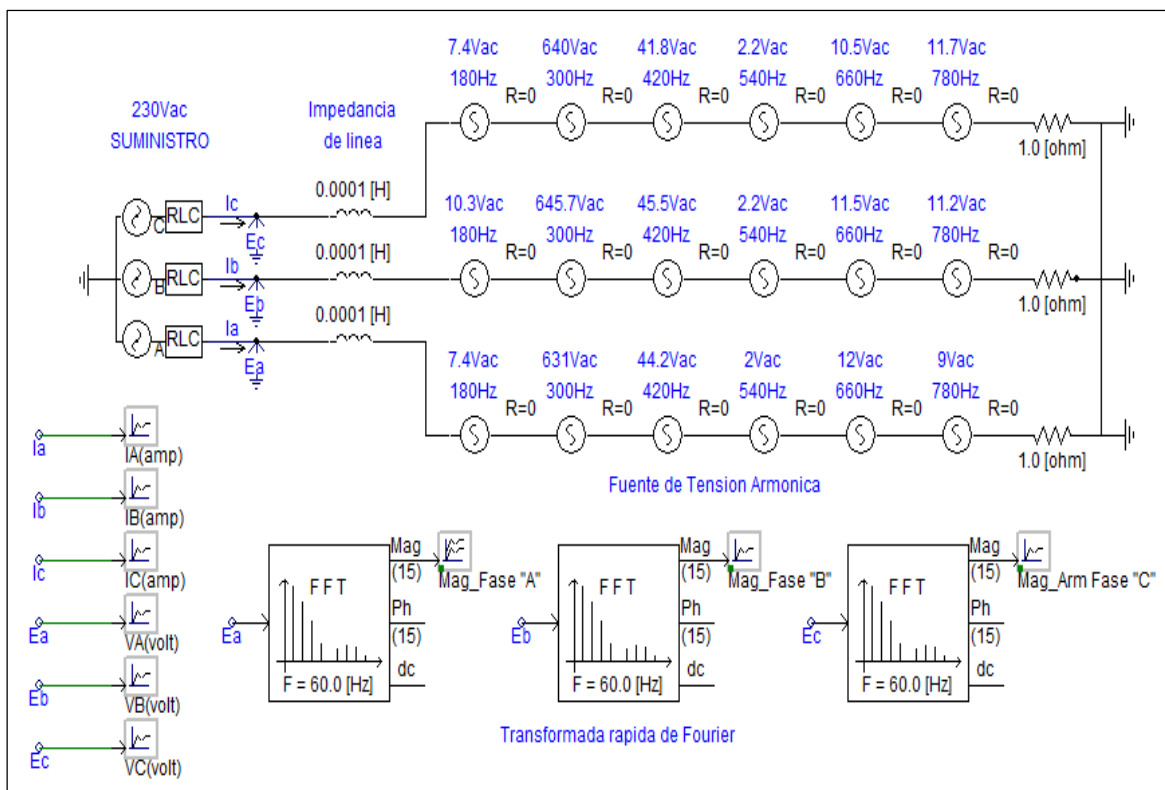


Figura N° 36 Fuente de tensión armónica, mediante PSCAD.

Fuente. Elaboración propia.

En la figura 36, se muestra el circuito que representa a una fuente generadora de tensión armónica, con valores de tensiones y frecuencias estimadas y semejantes a los resultados obtenidos por el equipo UNILYZER 902, con respecto a los espectros armónicos.

La figura 37 muestra las ondas de tensión y corriente senoidales por fase obtenidas a raíz del circuito indicado en la figura anterior, sin considerar el filtro diseñado.

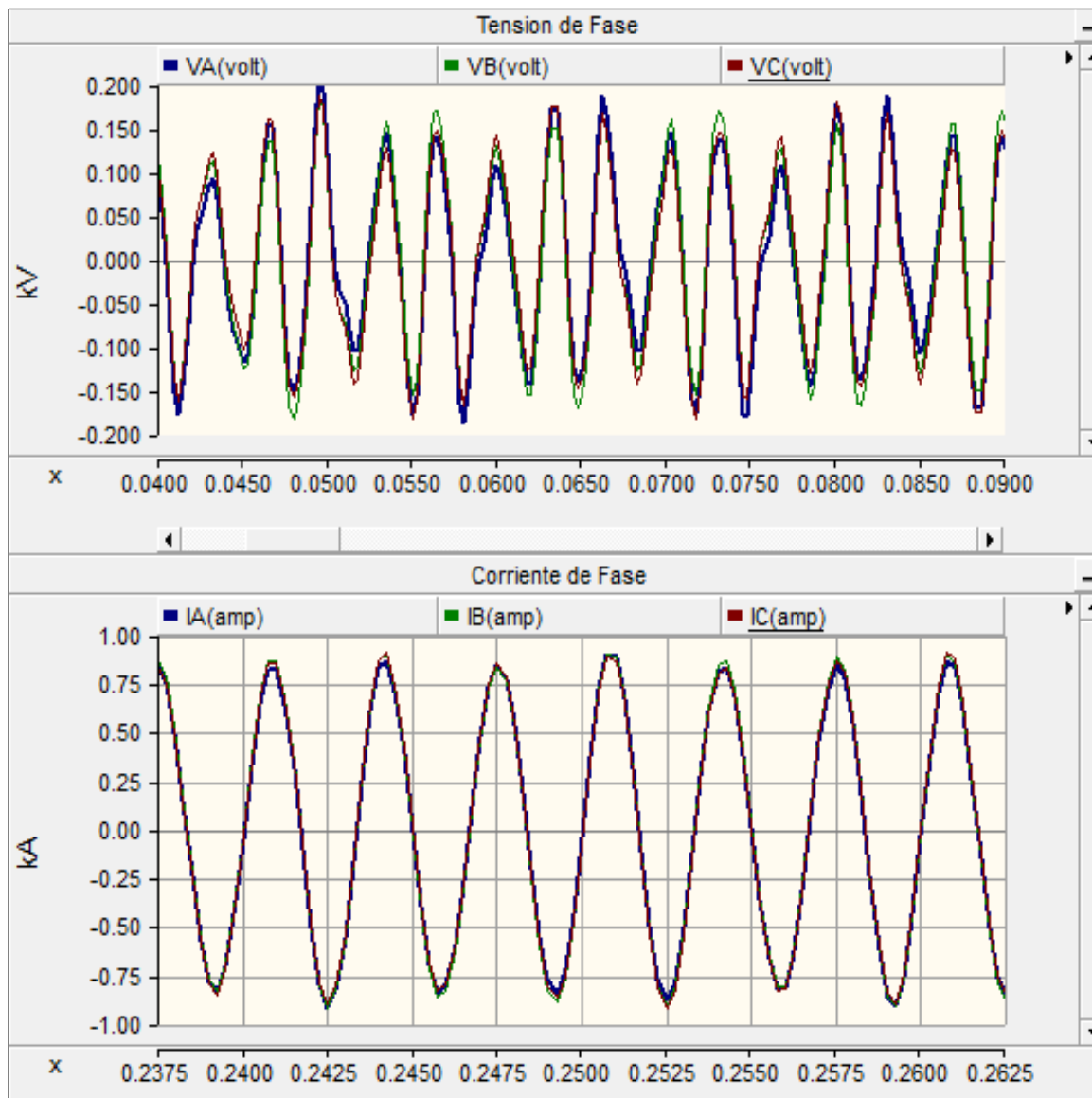


Figura N° 37. Salidas de tensión y corriente de fase.
Fuente. Elaboración propia, mediante PSCAD

En las figuras (38, 39, 40) se muestran las magnitudes de las tensiones armónicas desde el orden 1 hasta el orden 15, también se observa que es el armónico 5to, las que se encuentra con mayor cantidad en las tres fases, sobrepasando el 8% de distorsión armónica individual HDv.

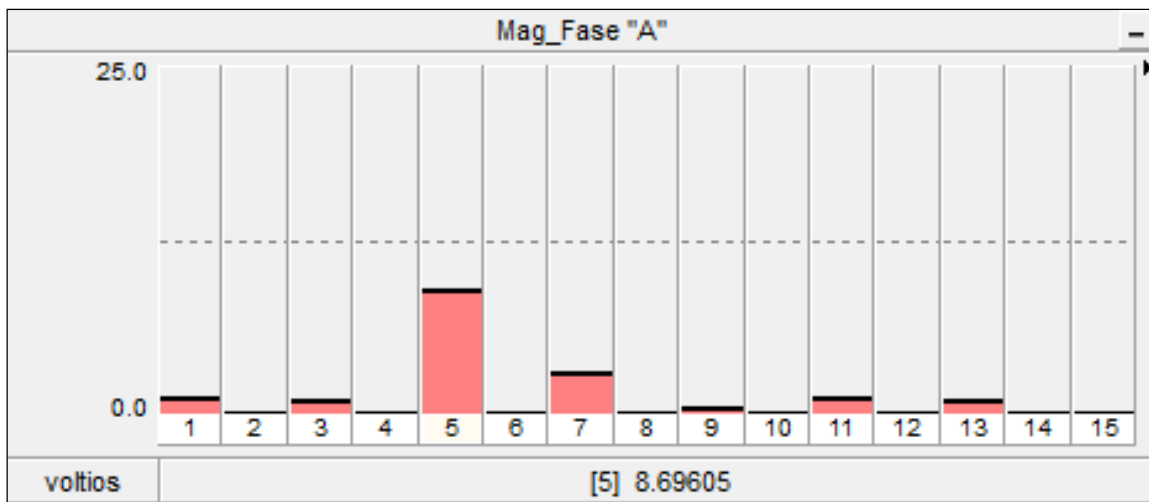


Figura N° 38. Magnitud Armónica de tensión de la fase "A" sin filtro.
Fuente. Elaboración propia, mediante PSCAD

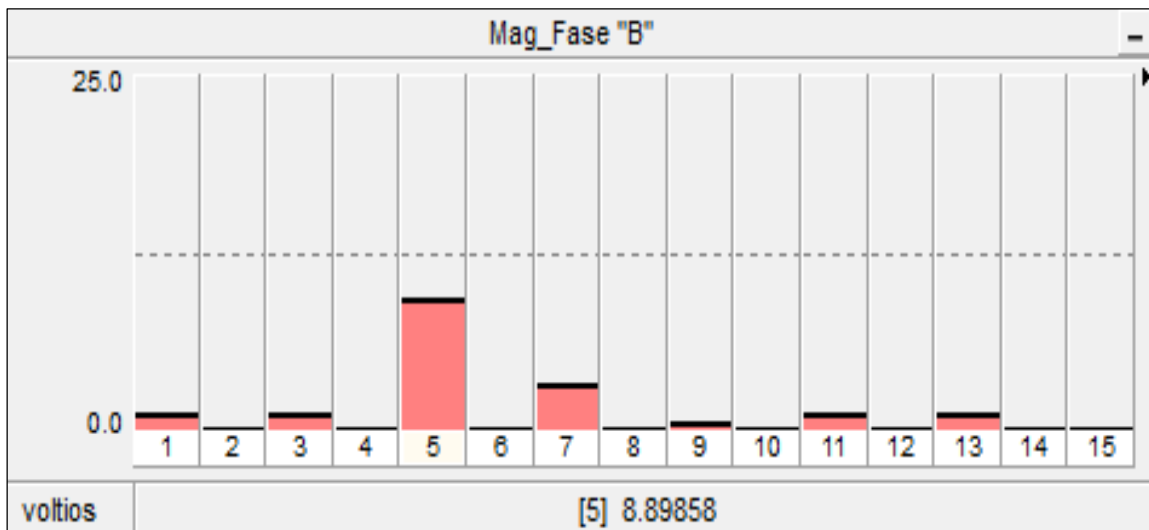


Figura N° 39. Magnitud Armónica de tensión de la fase "B" sin filtro.
Fuente. Elaboración propia, mediante PSCAD.

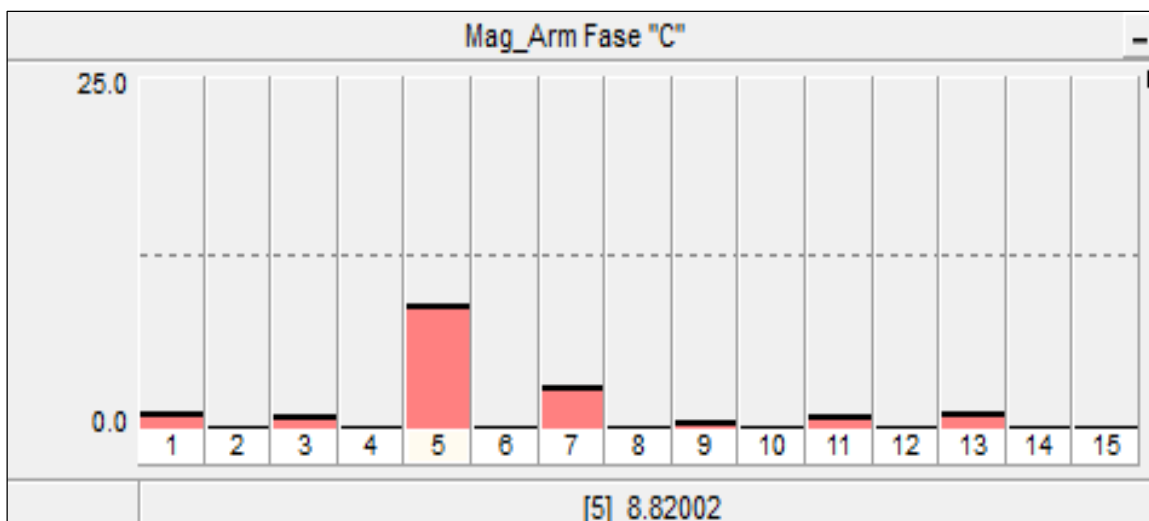


Figura N° 40. Magnitud Armónica de tensión de la fase "C" sin filtro.
Fuente. Elaboración propia, mediante PSCAD

De los resultados de la simulación en el software PSCAD, con respecto al espectro armónico de tensión se observa que las magnitudes armónicas se asemejan a los datos obtenidos por el equipo analizador de redes UNILYZER 902, a partir de ello se pretende realizar el diseño de filtro sintonizado para disminuir los espectros armónicos en especial el de 5to orden, porque es el armónico que esta fuera de los límites (6%) establecidos por la (NTCSE), por lo tanto, es necesario instalar un filtro pasivo del tipo sintonizado, con el objetivo de reducir el porcentaje del armónico, el cual quedará instalado como se muestra en la siguiente figura.

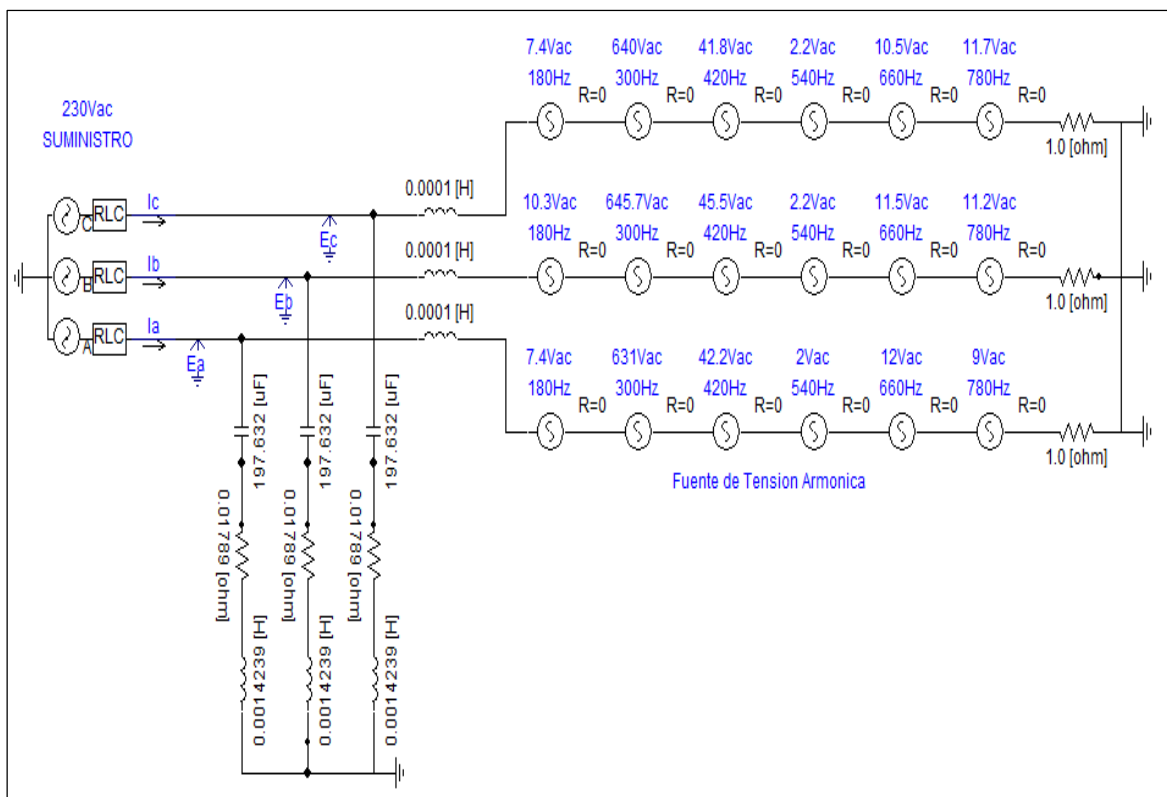


Figura N°41 instalación de filtro Pasivo, para el Armónico de orden 5°.
Fuente. Elaboración propia mediante PSCAD.

Se realiza la conexión en paralelo del filtro sintonizado con los valores calculados matemáticamente, con la finalidad de observar el comportamiento del espectro armónico de tensión en especial el de 5to orden, que fue motivo de diseño del presente estudio de tesis.

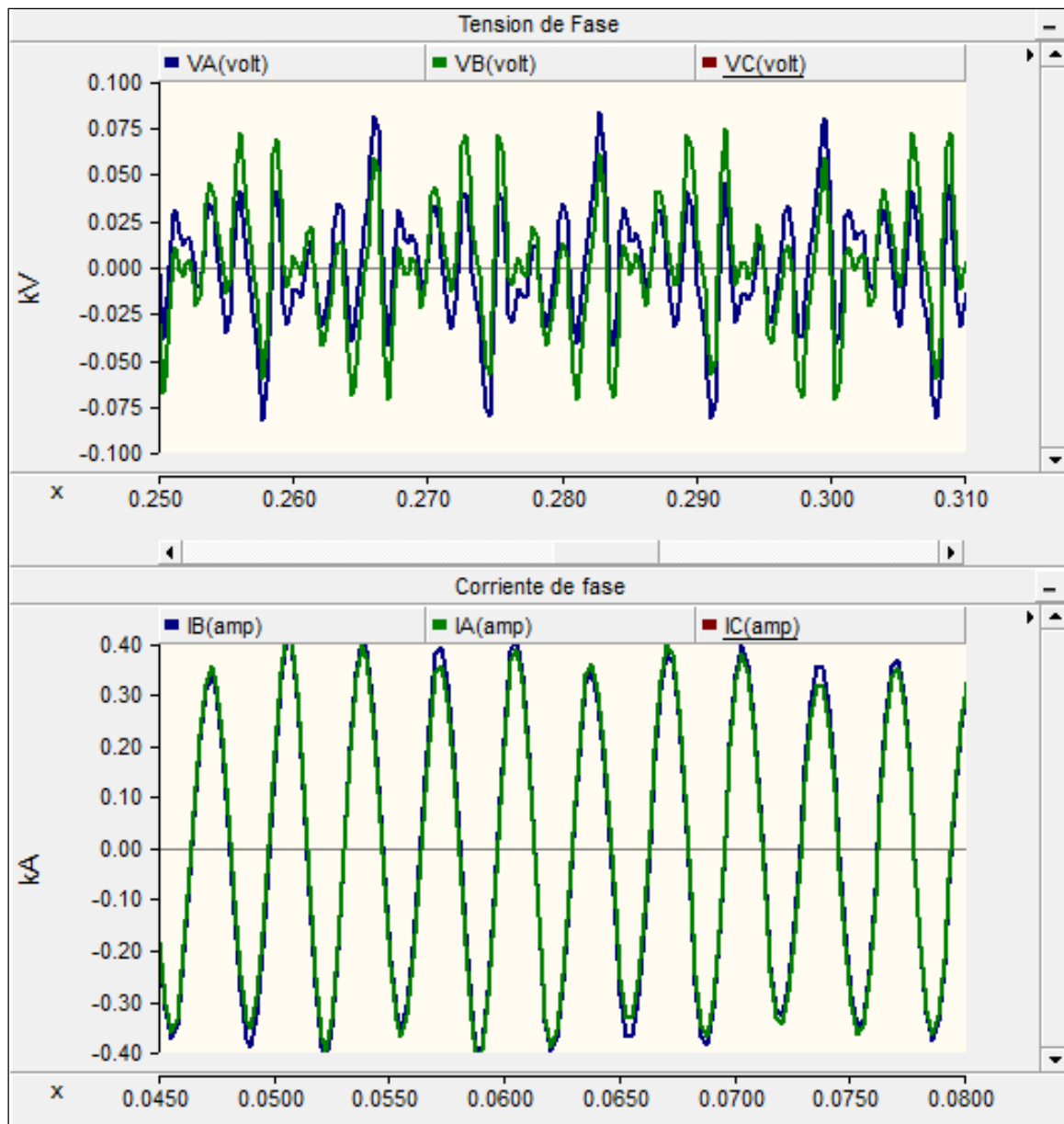


Figura N° 42 Perfiles de onda de tensión y corriente después de conectar el filtro Sintonizado.
Fuente. Elaboración propia mediante PSCAD.

De la figura anterior se observa una mejora en cuanto a las formas senoidales de tensión y corriente, a consecuencia de la instalación del filtro sintonizado en paralelo con la red eléctrica.

Con respecto a las magnitudes de los armónicos de tensión, los resultados después de la instalación del filtro sintonizado diseñado adecuadamente se muestran en las siguientes figuras.

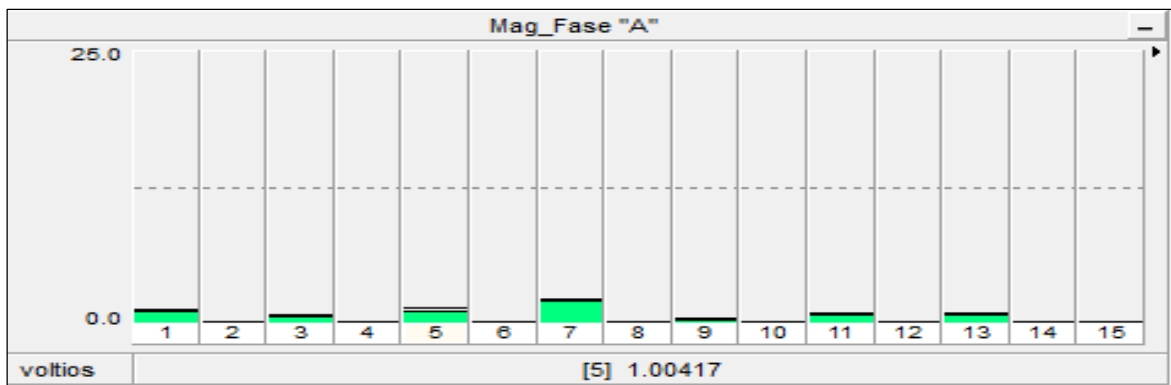


Figura N° 43. Magnitud Armónica de tensión de la fase “A” con filtro.
Fuente. Elaboración propia, mediante PSCAD

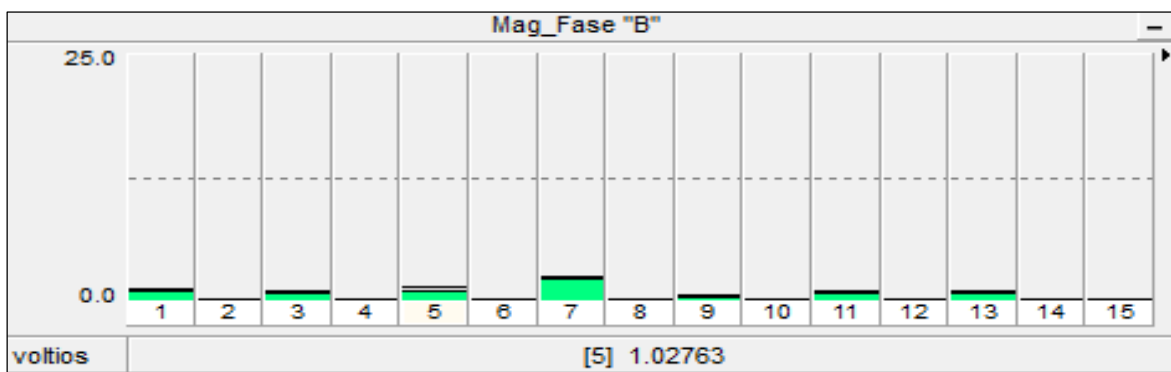


Figura N° 44. Magnitud Armónica de tensión de la fase “B” con filtro.
Fuente. Elaboración propia, mediante PSCAD

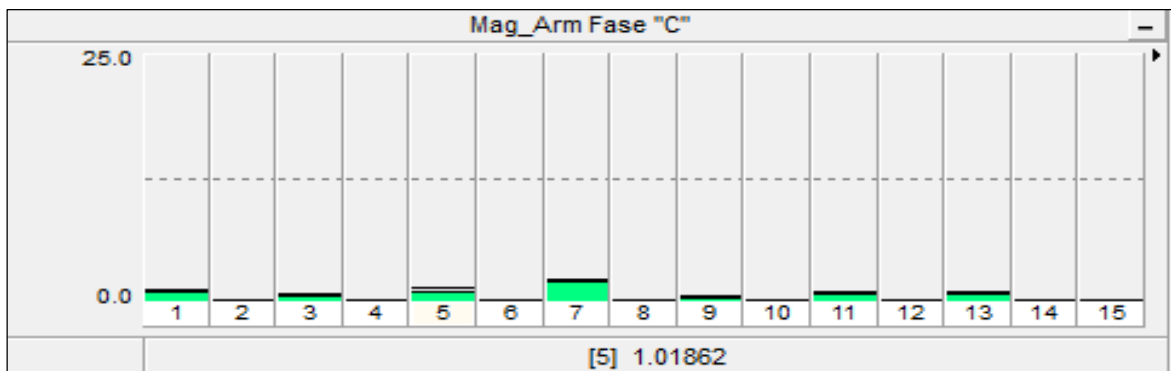


Figura N° 45. Magnitud Armónica de tensión de la fase “C”.
Fuente. Elaboración propia, mediante PSCAD

De los resultados obtenidos después de la simulación en el software PSCAD de un filtro pasivo del tipo sintonizado, se observa que las magnitudes de los armónicos individuales de tensión HDv, en especial de orden 5, han disminuido en aproximadamente 89 %, respecto al estado inicial, entonces se deduce que los valores calculados matemáticamente para el diseño del filtro sintonizado cumplen la función de reducir el armónico de orden 5.

4.3 METODOLOGÍA PARA EL DISEÑO DEL FILTRO UTILIZADO EN ESTE PROYECTO.

El siguiente paso consiste en diseñar el tipo de filtro armónico más conveniente, para mitigar los armónicos de tensión encontrados en las mediciones realizadas, donde se observó que el más representativo es el de 5to orden y para éste orden de armónico se realizara el diseño de Filtro Sintonizado, debido a que es posible sintonizar a una frecuencia en específico (300Hz).

El Filtro Pasivo es dimensionado dependiendo de la cantidad requerida de potencia reactiva a frecuencia fundamental (60 Hz). Para nuestro caso de estudio esta potencia se verá remplazada por el condensador del filtro diseñado.

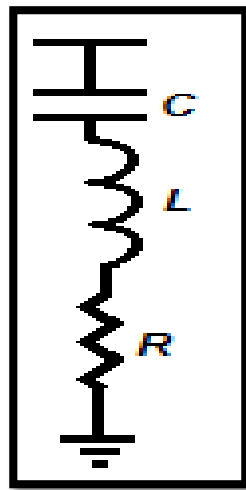


Figura N° 46 Filtro Pasivo simple para corrientes armónicas.
Fuente. Elaboración propia.

Para empezar con el cálculo de los parámetros del filtro, inicialmente necesitamos tener la capacidad de la potencia reactiva requerida en la instalación con el objetivo de elevar el factor de potencia, después de ello continuamos con las siguientes ecuaciones.

La reactancia del filtro viene dada por la siguiente relación.

$$X_{Filtro} = \frac{(V_{LL})^2}{VA_r} \quad \dots (4.1)$$

Además la reactancia del filtro a una frecuencia fundamental es.

$$X_{Filtro} = X_{Cap} - X_L \quad \dots (4.2)$$

Los filtros muy rara vez se sintonizan a un valor exacto de frecuencia, esto debido a que pueden entrar en resonancia con impedancias propias de la red o la carga con un determinado factor de sintonía tenemos.

$$\frac{X_{Cap}}{h} = h * X_L \quad \dots (4.3)$$

Donde h es el orden de armónico del cual se quiere mitigar, despejando tenemos que.

$$X_{Cap} = h^2 * X_L \quad \text{y como} \quad X_{Filtro} = X_{Cap} - X_L \quad \dots (4.4)$$

Sustituyendo y despejando X_{Cap} obtenemos.

$$X_{Cap} * (h^2 - 1) = h^2 * X_{Filtro} \quad \dots (4.5)$$

Tenemos en cuenta que el objetivo del diseño de un filtro Pasivo es el de facilitar una ruta de baja impedancia para corrientes de determinada frecuencia, se debe calcular la reactancia del capacitor en función del orden del armónico (h).

$$X_{Cap} = \frac{h^2}{h^2 - 1} * X_{Filtro} \quad \dots (4.6)$$

Con este valor de reactancia capacitiva podemos dimensionar el capacitor (faradios)

$$C_{Farad} = \frac{1}{W * X_{Cap}} \quad \dots (4.7)$$

El siguiente paso es determinar el valor de la reactancia inductiva, que a una determinada frecuencia entre en resonancia con el capacitor y proporcione una ruta de baja impedancia en el filtro, para eso se despeja la ecuación (4.3).

$$X_L = \frac{X_{Cap}}{h^2} \quad \dots (4.8)$$

Con este valor de reactancia inductiva se puede dimensionar el valor de la bobina (henrios).

$$L_{Henrio} = \frac{X_L}{W} \quad \dots (4.9)$$

Ahora con los valores de los elementos pasivos calculados, es necesario establecer el factor de calidad Q que está establecido por.

$$Q = \frac{X_L}{R} \quad \dots (4.10)$$

Este valor de Q es importante que sea lo más grande posible, pues a mayor valor de Q, más pequeña será la impedancia a la frecuencia de sintonía. Esto se debe a que a frecuencia de sintonía es solo la resistencia la que se ve reflejada en la impedancia del filtro.

El valor de R depende en gran parte del proceso constructivo de las bobinas. Este valor está dado por la resistencia propia del conductor, las pérdidas en el núcleo y en el entrehierro.

4.4 IMPLEMENTACIÓN DE DISEÑO DEL FILTRO PASIVO.

Las mediciones realizadas muestran que dentro de las instalaciones se generan una distorsión de una onda característica de un rectificador de 6 pulsos, la cual está compuesta básicamente por corrientes de (300 Hz) y (420 Hz) que corresponden al 5to y 7mo armónico respectivamente, que a su vez son de carácter cíclico, siendo todos los ciclos de la onda deformada de forma repetitiva.

Con respecto al aprovechamiento del filtro se requiere aporte adicional de potencia reactiva a (60 Hz) debido a que se tiene problemas con el factor de potencia, para lo cual se dimensiona la capacitancia requerida para levantar el factor de potencia de 0.98 a más.

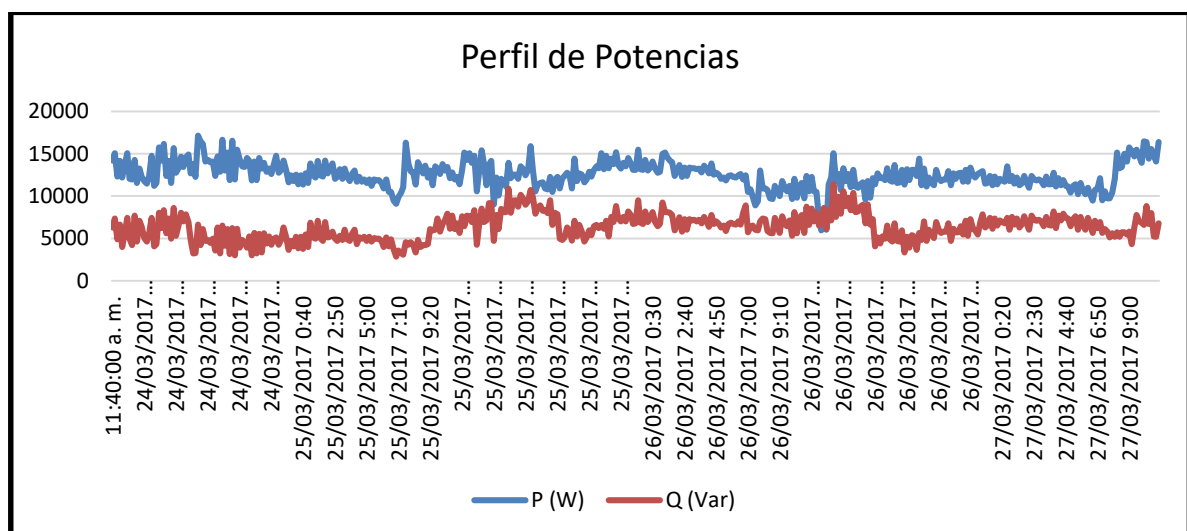


Figura N° 47. Comparación de perfil de potencias Activas y Reactivas totales registrados por el equipo.
Fuente. Elaboración propia en xls.

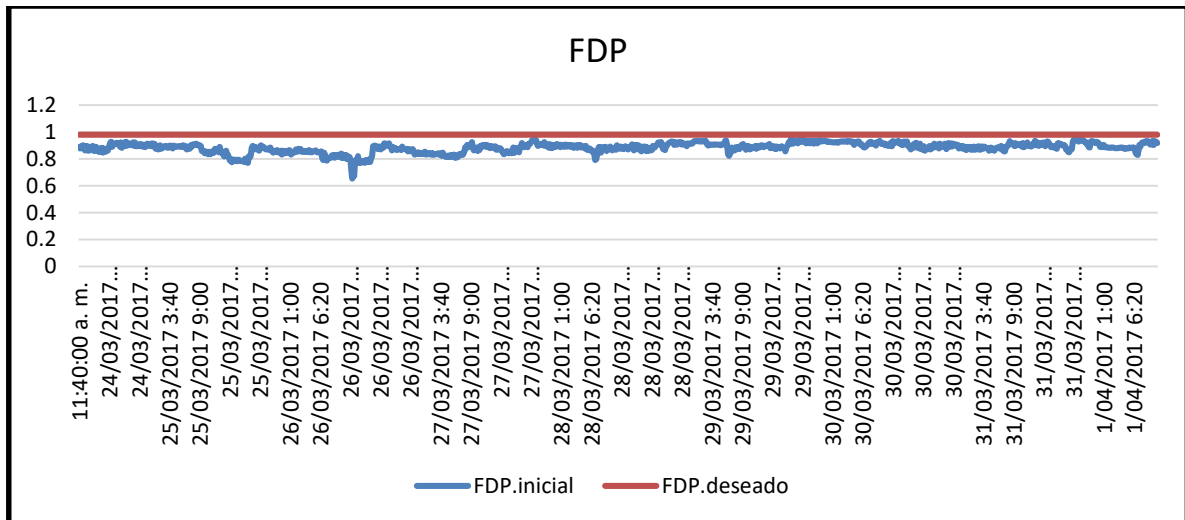


Figura N° 48. Perfil del factor de potencia medidos registrados por el equipo UNILYZER 902.
Fuente. Elaboración propia xls.

Teniendo las mediciones realizadas tanto de Potencias y el factor de potencia, procedemos a elaborar los cálculos matemáticos para la potencia reactiva requerida, con la finalidad de mejorar el factor de potencia que inicialmente se encuentra en 0.85, y se plantea mejorar a 0.98 con base en las normas nacionales que indican para justificar una inversión, se requiere como mínimo mejorar el factor de potencia, siguiendo las siguientes recomendaciones se siguen estas relaciones.

	P(W)	Q(VAr)	F.P	Tan(Øi)	F.P final	Q.c. (kvar)
Maxi	19669.99	11410.00	0.95	1.16	0.98	9.40
Mini	5530.00	2030.00	0.65	0.34	0.98	1.42
Prom	12193.07	6263.89	0.88	0.53	0.98	3.95

$$\theta_{ini} = \cos^{-1}(FP_1) = \cos^{-1}(0.88) = 28.36^\circ$$

$$\theta_{des} = \cos^{-1}(FP_2) = \cos^{-1}(0.98) = 11.48^\circ$$

$$Q_{(reac)} = P_{(activa)}(\tan\theta_{ini} - \tan\theta_{des})$$

$$Q_{(reac)} = 12193.07(\tan(28.36) - \tan(11.48))$$

$$Q_{(reac)} = 4.10549KVar$$

Mediante este resultado, la configuración para los condensadores trifásicos utilizados para aumentar el factor de potencia, planteamos que estaría formado por tres condensadores trifásicos conectados a la línea de alimentación de 230 Vac, se tiene en cuenta que el valor

del condensador más cercano y comercial es de 1.5 KVAR, haciendo un total de 4.5 kVAR, para el sistema.

Se tiene que para una frecuencia de 300Hz y a una tensión de línea de 230V que va funcionar el filtro en conexión delta. Esta conexión ofrece un mejor aprovechamiento del condensador en cuanto a su capacidad de entregar potencia reactiva.

$$X_{Filtro} = \frac{(230)^2}{4105.49} = 12.885\Omega$$

Se tiene en cuenta que para evitar algún inconveniente por resonancia por alguna impedancia propia de la red o de la misma carga, se utiliza un factor de sintonía de 95%, sin embargo, tratándose de filtros sintonizados a una frecuencia exacta, se considera el factor de sintonía 105% y utilizando la ecuación (4.6) se tiene.

$$X_{Cap} = \frac{(5)^2}{(5)^2 - 1} * 12.885 = 13.4218\Omega$$

Con este valor de reactancia capacitiva se puede dimensionar el capacitor (faradios)

$$C_{Farad} = \frac{1}{376.9911 * 13.4218} = 197.6324\mu F$$

Para el diseño de la bobina se tiene que tener en cuenta las siguientes características.

- ✓ Espiras para una capacidad de $\frac{150KVA}{230*\sqrt{3}} * 30\% = 112.96 \text{ Amperios}$
- ✓ Conexión Trifásica.
- ✓ Tensión Nominal 230V.

Teniendo en cuenta la ecuación (4.8) y despejando el valor de X_L se tiene que.

$$X_L = \frac{13.4218}{(5)^2} = 0.5368 \Omega$$

Con este valor de la reactancia inductiva se puede dimensionar el inductor (henrios)

$$L_{Henrios} = \frac{0.5368}{376.9911} = 1.4239mH$$

Con un factor de calidad de 30 tendríamos

$$Q = \frac{X_L}{R}, R = \frac{X_L}{Q} = \frac{0.5368}{30} = 17.893m\Omega$$

4.5 ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DEL FILTRO DISEÑADO PARA 5to ARMÓNICO

De acuerdo a los cálculos obtenidos matemáticamente, para el filtro armónico de orden 5, se tienen las características y especificaciones técnicas mencionadas.

Tipo de conexión en baja tensión	Triangulo
Potencia reactiva por rama (Var)	4105.49
Tensión de alimentación L-L (V)	230
Inductor (L) en mili Henrios	1.4239
Capacitor (C) en micro Faradios	197.632
Resistencia (R) en mili ohmios	17.893
Factor de sintonía	100%

Tabla N° 32. Características constructivas para diseñar filtro del 5to armónico
Fuente. Elaboración propia.

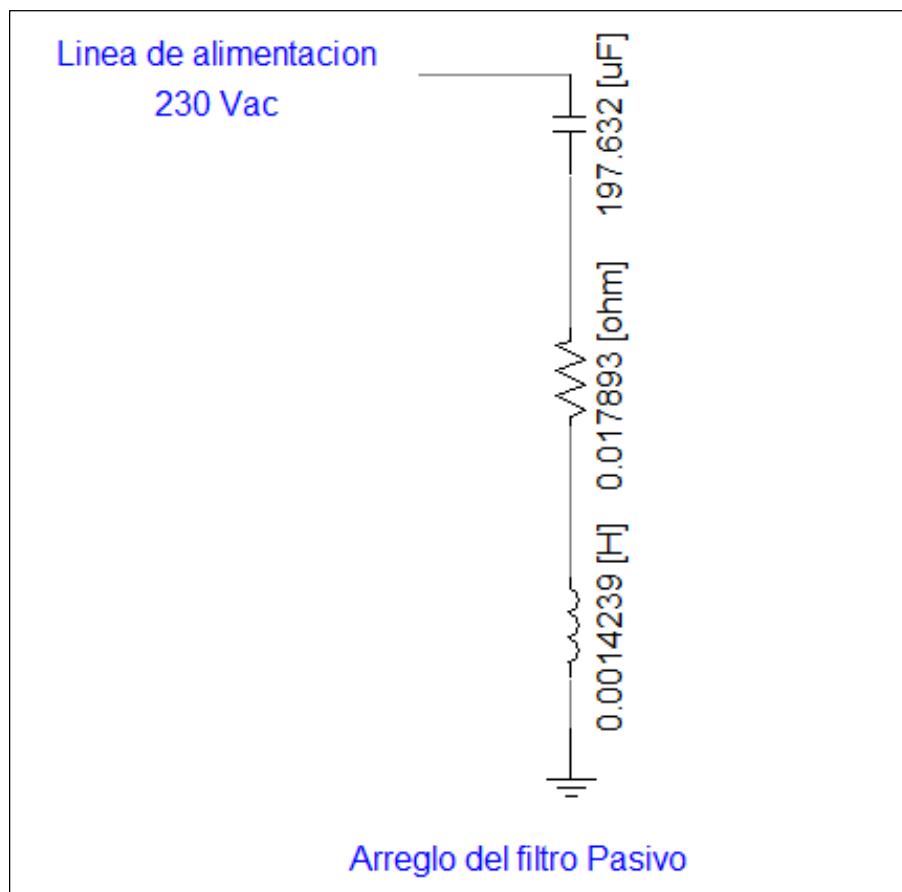


Figura N° 49. Arreglo del filtro armónico Diseñado para el 5to armónico
Fuente. Elaboración propia.

a). Características técnicas del condensador. Para asegurar una buena operatividad del filtro pasivo, se requiere cumplir con ciertas características técnicas que presente el condensador para trabajar en entornos industriales.

Descripción	Condensador especialmente diseñado para la corrección del factor de potencia en entornos industriales, con sistema MKP de polipropileno metalizado compacto.
Conformidad a Normas	IEC 60831-1/2
Tensión máxima	Vr + 10% (8 horas/día), Vr + 15% (30 min./día), Vr + 20% (5 min./día), Vr + 30% (1 min./día)
Intensidad máxima	$1,5 \cdot I_r$ incluyendo efectos combinados de armónicos, sobretensiones y capacidad.
Frecuencia nominal	60 Hz
Temperatura ambiente	-40 hasta una máxima de 55°C
Humedad admisible (Hrel)	95%
Altitud de montaje	Máx. 4.000 metros por encima del nivel del mar
Anclaje	Tuerca M12 (10 N·m)
Posición de montaje	vertical
Refrigeración admisible	Refrigeración natural



Condensador trifásico para baja tensión 230VAC

b). Características técnicas del filtro pasivo. Para garantizar una buena operatividad del filtro diseñado se recomienda cumplir con las siguientes especificaciones técnicas de funcionamiento del filtro sintonizado de 60 Hz.

Tensión nominal de operación	3 x 230 a 380 V C
Margen de tolerancia de voltaje	3 x 386 a 444 V CA
Frecuencia de operación	60 Hz \pm 1 Hz
Red	TN, TT, IT
Eficiencia	>98% a tensión nominal de línea y potencia
Tensión del enlace CC del accionamiento	-5% ~ +10% nominal VCC
Categoría de protección	IP 00, IP 20
Grado de contaminación	PD3 (de acuerdo a la norma IEC 60664-1)
Enfriamiento	Enfriamiento interno por ventilador o enfriamiento externo
Capacidad de sobrecarga	1,6 veces la corriente nominal durante 1 minuto, una vez por hora
Corriente capacitiva sin carga	<20% de la corriente nominal de entrada, a 380 V CA
Rango de temperatura ambiente	-25°C a +45°C en pleno funcionamiento +45° C a +70°C con operación reducida -25°C a +85°C para transporte y almacenamiento
Clase de inflamabilidad	UL 94V-2
Vida útil (calculada)	\geq 10 años



Bobinado para el Filtro Armónico

4.6 EVALUACIÓN DEL BARRIDO DE FRECUENCIA.

El presente análisis denominado barrido de frecuencia es ampliamente utilizado cuando se realiza diseños de Filtros Armónicos Pasivos, básicamente consiste en determinar la impedancia armónica con respecto a la frecuencia, para el presente estudio de investigación se evalúa el barrido de frecuencia hasta el orden armónico 21, con incrementos de 5 Hz hasta un total de frecuencia de $(21 \times 60\text{Hz} = 1260\text{Hz})$, de acuerdo a los valores calculados anteriormente mostrados en la tabla N° 32, y Las consideraciones para los elementos del sistema eléctrico en el punto de conexión común se tiene que.

Elementos- Filtro Sintonizado	Elementos- Sistema
R= 0.017893 Ω .	R(equivalente)=0.031 Ω .
L= 0.0014239 H	L(equivalente)=0.00113 H
C= 0.000197632 F	C(equivalente)=0.0002318F

Además la impedancia está relacionada con la reactancia tal como se muestras en la

siguiente formula.

$$Z = \sqrt{R^2 + X_{Total}^2}$$

$$X_{Total} = [X_L - X_C]$$

$$X_C = \frac{1}{2\pi fC} , \quad X_L = 2\pi fL$$

Teniendo en cuenta los valores de R, L, y C, además las relaciones indicadas anteriormente se realizan la siguiente tabla, para luego graficar los resultados.

f (Hz)	XL(filtro)	Xc(filtro)	X(filtro)	Z (Filtro)	XL	Xc	X	Z(Sistema)
60	0.5368	13.4218	-12.8850	12.8850	0.4260	11.4414	-11.015	11.0155
65	0.5815	12.3894	-11.8078	11.8079	0.4615	10.5613	-10.099	10.0999
70	0.6263	11.5044	-10.8782	10.8782	0.4970	9.8069	-9.3099	9.3100
295	2.6393	2.7299	-0.0906	0.0924	2.0945	2.3271	-0.2326	0.2346
300	2.6840	2.6844	-0.0004	0.0179	2.1300	2.2883	-0.1583	0.1613
305	2.7287	2.6404	0.0884	0.0902	2.1655	2.2508	-0.0853	0.0907
310	2.7735	2.5978	0.1757	0.1766	2.2010	2.2145	-0.0135	0.0338
315	2.8182	2.5565	0.2616	0.2623	2.2365	2.1793	0.0572	0.0650
1250	11.1833	0.6442	10.5390	10.5391	8.8750	0.5492	8.3258	8.3259
1255	11.2280	0.6417	10.5863	10.5864	8.9105	0.5470	8.3635	8.3636
1260	11.2728	0.6391	10.6336	8.3040	8.9460	0.5448	8.4012	8.4012

Tabla N° 33. Resultados de la impedancia Armónica.

Fuente. Elaboración propia.

La tabla anterior indica los resultados numéricos calculados para las reactancias y la impedancia armónica, considerando una frecuencia de 60 Hz hasta 1260 Hz, con incremento de 5 Hz.

En la siguiente figura N° 50, se observa el perfil del comportamiento de la impedancia vs la frecuencia armónica, también denominado respuesta en frecuencia diseñado para el 5to armónico (300Hz), bajo las condiciones iniciales mostrados en la página 90 considerado un factor del sintonía del 100 %, donde es apreciable la disminución de la impedancia armónica iniciando en 12.8850Ω con una frecuencia 60Hz, a medida que se incrementa la frecuencia armónica, llegando a una sintonía de 300Hz con una impedancia de 0.0179Ω, una vez llegado al punto de sintonía la impedancia armónica se incrementa directamente con la frecuencia hasta un valor de 10.2548Ω con una frecuencia de 1220Hz, matemáticamente la frecuencia de sintonía " f_0 " se representa con la siguiente relación, para valores calculados de $L = 1.4239mH$ y $C = 197.632\mu F$.

$$f_0 = \frac{1}{(2\pi) * (\sqrt{L * C})}$$

$$f_{0-Filtro} = \frac{1}{(2\pi) * (\sqrt{0.0014239 * 0.000197632})} = 300.021 \text{ Hz}$$

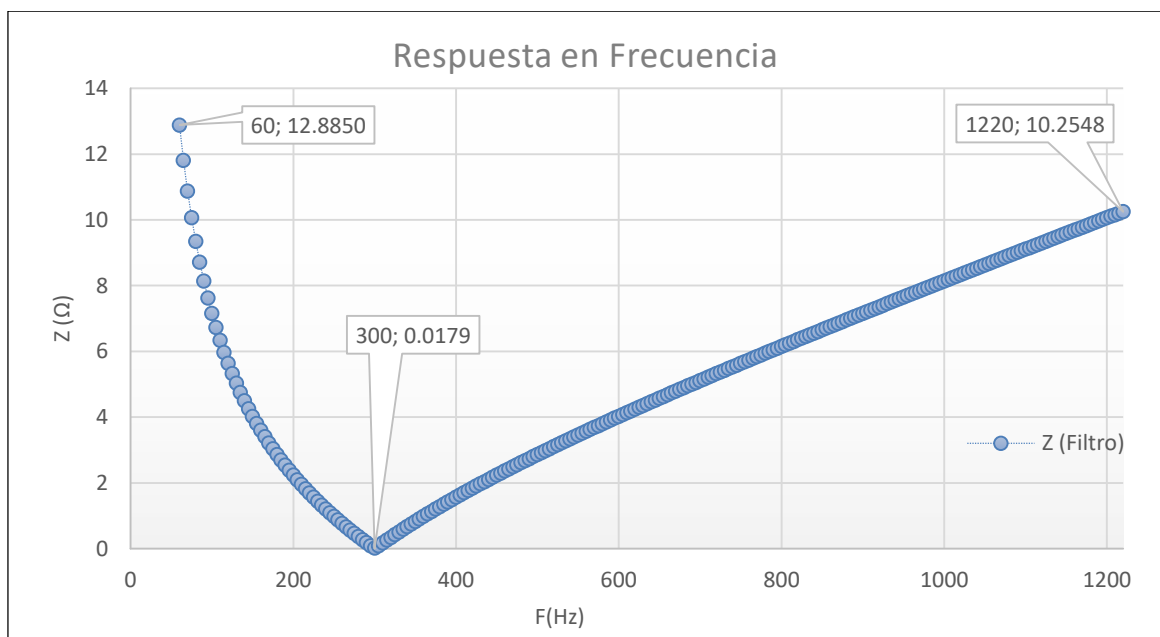


Figura N° 50. Respuesta en frecuencia del filtro Diseñado.
Fuente. Elaboración propia xls.

En la siguiente figura N° 51, se observa la respuesta en frecuencia del filtro frente al SEP diseñado para el 5to armónico, donde la impedancia en frecuencia va disminuyendo hasta llegar a una frecuencia de sintonía de 310 Hz, con un valor de 0.0338Ω , a raíz de la interacción del filtro diseñado con el sistema eléctrico se observa que la frecuencia de sintonía del sistema eléctrico presenta un ligero incremento de 10Hz con respecto a la frecuencia de sintonía del filtro diseñado, para valores de $L_{EQUI} = 0.00113H$, $C_{EQUI} = 0.00023184F$ y $R_{EQUI} = 0.031\Omega$ matemáticamente la frecuencia de sintonía " f_0 " se expresa de la siguiente manera.

$$f_{0-Sistema} = \frac{1}{(2\pi) * (\sqrt{0.00113 * 0.00023184})} = 310.94 \text{ Hz}$$

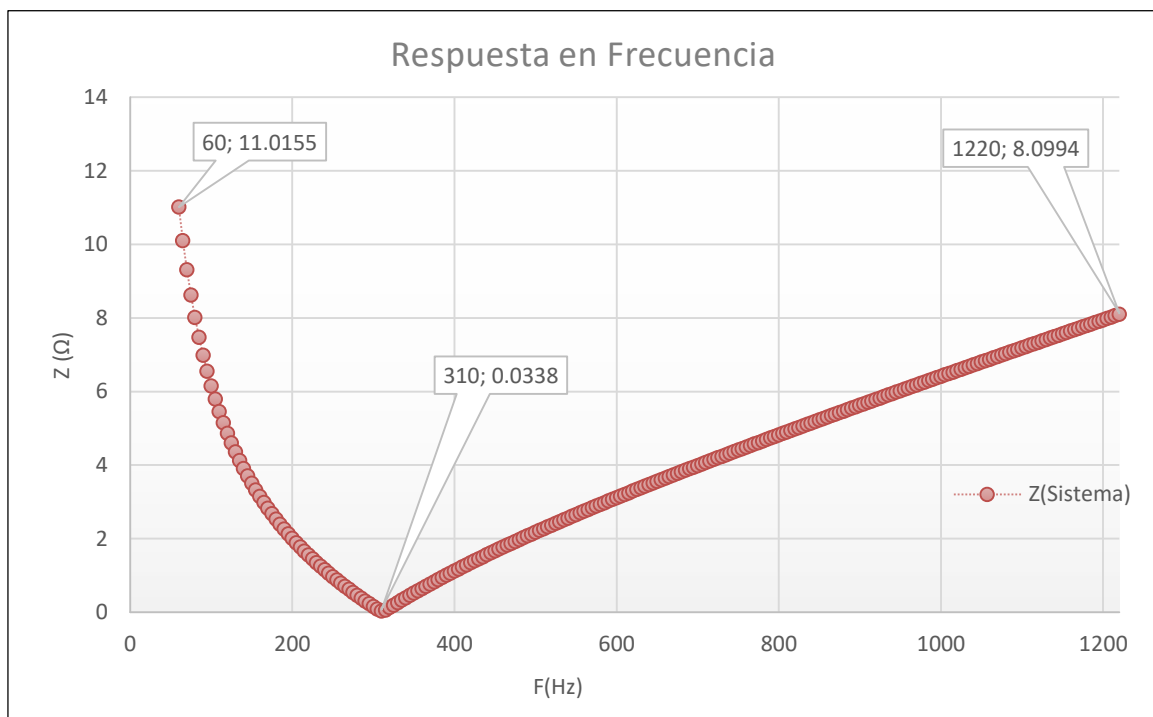


Figura N° 51. Respuesta en frecuencia del sistema eléctrico más el filtro Diseñado.
Fuente. Elaboración propia xls.

En la siguiente figura N° 52 se observa la variación de la respuesta en frecuencia del SEP en funcionamiento con el filtro diseñado para 300Hz, el cual la frecuencia de resonancia se modificó a 310.94Hz presentándose un error del 3.64%.

$$f_{0-Filtro} = \frac{1}{(2\pi) * (\sqrt{0.0014239 * 0.00019763})} = 300.021 \text{ Hz}$$

$$f_{0-Sistema} = \frac{1}{(2\pi) * (\sqrt{0.00113 * 0.00023184})} = 310.94 \text{ Hz}$$

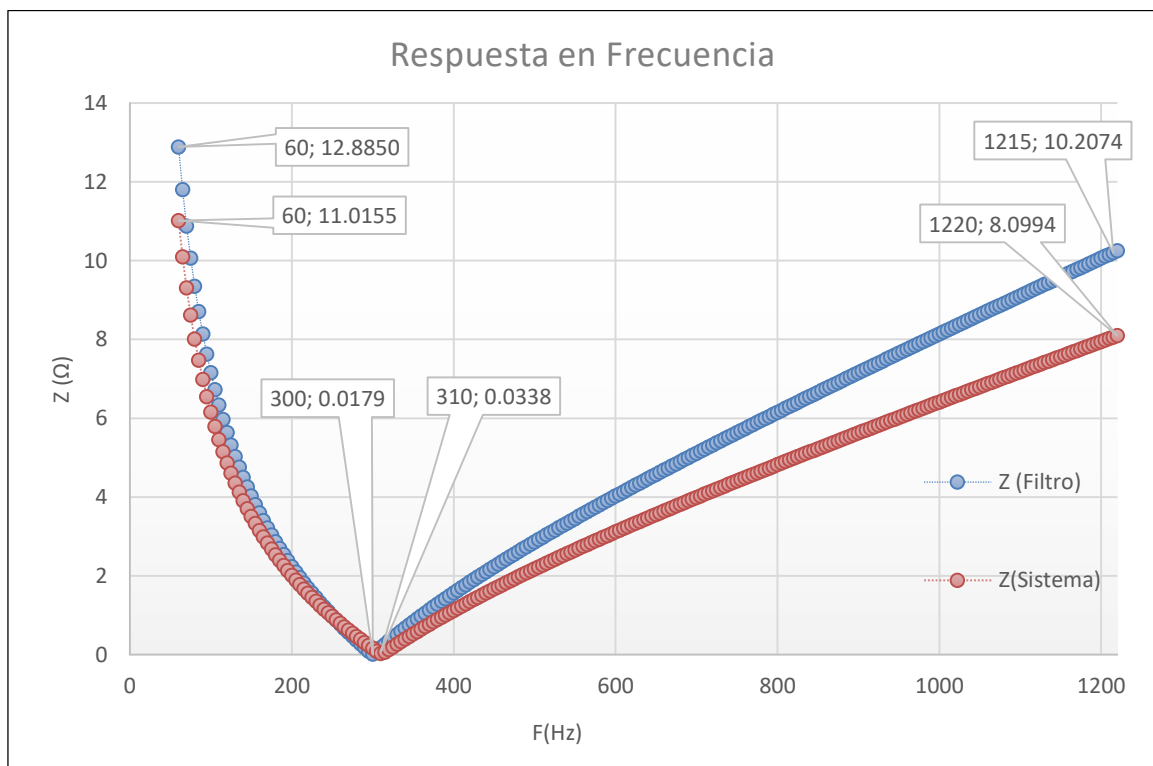


Figura N° 52. Variación de la respuesta en frecuencia del sistema eléctrico más el filtro Diseñado.
Fuente. Elaboración propia xls.

CAPITULO 5

EVALUACIÓN DE LOS RESULTADOS

5.1 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS.

En vista que se tiene los resultados de la medición de armónicos en el punto de la instalación eléctrica se verifico que existen armónicos tanto de tensión y corriente que sobrepasan los límites establecidos por las Normativas referenciales, por lo tanto se requiere el diseño del filtro Pasivo el cual su procedimiento se muestra en el capítulo IV. Dicho eso se requiere comprobar la correcta funcionalidad de los mismos, para lo cual se siguen los siguientes procedimientos.

Se requiere que el filtro diseñado guie una ruta de mínima impedancia a la frecuencia necesaria, por lo tanto, es necesario cumplir con la siguiente relación de reactancias.

$$X_L = X_C$$

$$X_{C(h=5)} = \frac{X_C}{h} = \frac{13.4218}{5} = 2.684$$

$$X_{L(h=5)} = X_L * h = 0.5368 * 5 = 2.684$$

Con la finalidad de comprobar que nuestro filtro a diseñar no presente problemas por posibles sobre corrientes a causa de los armónicos existentes, se comprueba que la corriente total RMS no exceda el 1.35 de la corriente fundamental tal como se establece en la norma IEEE-18-2002. [16]

$$I_{funda} = \frac{\frac{V_{LL}}{\sqrt{3}}}{X_C - X_L} = 10.306A$$

Cálculo de corrientes armónicas con respecto a la fundamental.

$$I_3 = 2.647\%I_{funda} = 0.273 A$$

$$I_5 = 6.334\%I_{funda} = 0.653A$$

$$I_7 = 4.717\%I_{funda} = 0.486A$$

$$I_9 = 0.543\%I_{funda} = 0.056A$$

$$I_{11} = 0.432\%I_{funda} = 0.045A$$

$$I_{13} = 1.712\%I_{funda} = 0.176A$$

$$I_{15} = 0.099\%I_{funda} = 0.011A$$

$$I_{17} = 1.346\%I_{funda} = 0.139A$$

$$I_{19} = 0.754\%I_{funda} = 0.078A$$

$$I_{21} = 0.077\%I_{funda} = 0.0079A$$

$$I_{Total\ RMS} = \sqrt{I_1^2 + I_3^2 + I_5^2 + I_7^2 + I_9^2 + I_{11}^2 + I_{13}^2 + I_{15}^2 + I_{17}^2 + I_{19}^2 + I_{21}^2}$$

$$\%margen\ de\ corriente = \frac{I_{TotalRMS}}{I_{Total\ fundam}} 100 = 100.409 \%$$

$$I_{Total\ RMS} = 1.004095I_{Fundam} < 1.35I_{Fundam}$$

Como siguiente paso se tiene que revisar, la tensión pico del sistema que no sobrepase la tensión de diseño del banco de condensadores, se comprueba que este no supere el 130% a la tensión de fase pico del sistema tal y como se establecen en la IEEE 18-2002. [16]

Cálculo de la tensión de condensador a una frecuencia fundamental.

$$V_C = I_{funda} * X_C = 138.325 V$$

Calculo de las tensiones provocadas por las armónicas consideradas hasta el orden 21 °.

$$V_{C(h)} = \sum_h^n I(h) \frac{X_C}{h}$$

$$V_{C(3)} = 0.273 \frac{13.4218}{3} = 1.2216 V$$

$$V_{C(5)} = 0.653 \frac{13.4218}{5} = 1.7528 V$$

$$V_{C(7)} = 0.486 \frac{13.4218}{7} = 0.9318 V$$

$$V_{C(9)} = 0.056 \frac{13.4218}{9} = 0.0835 V$$

$$V_{C(11)} = 0.045 \frac{13.4218}{11} = 0.0549 V$$

$$V_{C(13)} = 0.176 \frac{13.4218}{13} = 0.1817 V$$

$$V_{C(15)} = 0.011 \frac{13.4218}{15} = 0.0984 V$$

$$V_{C(17)} = 0.139 \frac{13.4218}{17} = 0.1097 V$$

$$V_{C(19)} = 0.078 \frac{13.4218}{19} = 0.0551 V$$

$$V_{C(21)} = 0.008 \frac{13.4218}{21} = 0.051 V$$

$$V_{C(h)} = 4.56 V$$

Calculo de la tensión pico por cada fase del capacitor.

$$V_{C L-N total Pico} = \sqrt{2}[V_C + V_h]$$

$$V_{C L-N total Pico} = 194.409 V$$

Calculo del voltaje de fase del sistema.

$$V_{L-N Sist} = \frac{V_{L-L Sist}}{\sqrt{3}} = \frac{230}{\sqrt{3}} = 132.79 V$$

Calculo de la tensión de fase pico del sistema.

$$V_{L-N Sist.pico} = \sqrt{2} * V_{L-N Sist} = 187.794 V$$

$$\%margen de voltaje pico = \frac{V_{C L-N sist.Pico}}{V_{L-N sist.Pico}} 100$$

$$\%margen de voltaje pico = 103.522 \%$$

$$V_{C L-N total Pico} = 1.035 V_{L-N Sist.pico} < 1.3 V_{L-N Sist.pico}$$

Del resultado anterior se observa que el margen de la tensión pico cumple con lo establecido en la IEEE 18-2002. [16]

El resultado de la tensión RMS del sistema no debe superar la tensión RMS de diseño del banco de condensadores, se comprueba que este valor no supere el 110% a la tensión de fase RMS del sistema, tal como lo indica la IEEE 18-2002.

Cálculo del valor RMS del condensador.

$$V_{C\ L-N\ RMS} = \sqrt{V_1^2 + V_3^2 + V_5^2 + V_7^2 + V_9^2 + V_{11}^2 + V_{13}^2 + V_{15}^2 + V_{17}^2 + V_{19}^2 + V_{21}^2}$$

$$V_{C\ L-N\ RMS} = 132.929\ V$$

Determinación de la tensión fase RMS del sistema.

$$V_{L-N\ RMS} = \frac{V_{LL\ Siste}}{\sqrt{3}} = 132.791\ V$$

$$\%margen\ de\ voltaje\ RMS = \frac{V_{C\ L-N\ RMS}}{V_{L-N\ sist.}} 100$$

$$\%margen\ de\ voltaje\ RMS = 100.10392\%$$

$$V_{C\ L-N\ total\ RMS} = 1.0010392V_{L-N\ Sist.RMS} < 1.1V_{L-N\ Sist.RMS}$$

El valor de la tensión RMS del sistema cumple con lo establecido en la IEEE 18-2002. Se procede a corroborar la potencia reactiva en principio a la presente Norma.

$$Q_{3\phi Recalculada} = \frac{(V_{C\ L-N\ RMS})^2}{X_C} * 3$$

$$Q_{3\phi Recalculada} = 3931.644\ VAr$$

$$\%margen\ de\ VAr = \frac{Q_{3\phi Recalculada}}{Q_{(reac)}} 100$$

$$\%margen\ de\ VAr = 95.7655\%$$

$$Q_{3\phi Recalculada} = 0.95765Q_{Reac} < 1.35Q_{Reac}$$

El valor de la potencia reactiva cumple con los requisitos establecidos en la IEEE 18-2002. [16]

Para dar por terminado con el diseño de filtro Pasivo, se comprueba el recalentamiento del dieléctrico del capacitor sea consentido en principio con la IEEE 18-2002, el cual es evaluado por la desigualdad siguiente.

$$\sum_h^N [V_{C(h)} * I_{C(h)}] \leq 1.35 Q_{Recalculada}$$

$$\{3 * [(132.908 * 10.306 + 1.226 * 0.273 + 1.761 * 0.653 + 0.936 * 0.486 + 0.084 * 0.056 + 0.055 * 0.045 + 0.183 * 0.176 + 0.099 * 0.011 + 0.110 * 0.139 + 0.055 * 0.078 + 0.00511 * 0.0079)]\} \leq (1.35 * 3931.644 \text{ VAr})$$

Comparando las desigualdades se tiene.

$$4.1152495 \text{ VAr} \leq 5.3077 \text{ VAr}$$

La desigualdad es satisfactoria con un margen substancial, por lo cual el recalentamiento del dieléctrico de diseño propuesto, es aceptable.

5.2 CONCLUSIONES

Teniendo en cuenta el desarrollo del presente estudio de tesis se concluye que, mediante el estudio realizado a los diferentes problemas que ocasionan una mala calidad de energía se determinó el de mayor incidencia, los denominados armónicos de tensión y corriente, dicho esto se comprobó que los armónicos de tensión son analizables mediante el equipo analizador de redes trifásicos UNILYZER 902 y que pueden ser visibles en la computadora mediante su propio programa UNIPOWER PQ, donde se pudo observar las cantidades armónicas totales THD, e individuales HDi, además se visualizó que en algunos intervalos de medición las cantidades armónicas individuales pasan lo establecido en la NTCSE, así por ejemplo, para el orden de armónico 5to presenta un valor numérico de 8.898% de distorsión armónica, sin embargo, la (NTCSE), indica un valor máximo de 6.0%, para este orden de armónico, frente a éste problema se propone como alternativa de solución, el realizar un diseño de filtro Pasivo exclusivamente el de tipo sintonizado, por la característica que presenta una impedancia baja a una frecuencia de sintonía de 300Hz que representa al 5to armónico ($5 \times 60\text{Hz} = 300\text{Hz}$), se verificó también mediante la simulación en el PSCAD que la interacción del filtro en el PAC, disminuye el 5to armónico en 89% aproximadamente, además se realizó el análisis de barrido de frecuencia con la finalidad de comprobar el desempeño del filtro incluyendo la influencia del sistema interconectado, presentándose un margen de error aceptable de 3.64%.

✓ Se logró describir la metodología básica que consiste en interpretar los registros almacenados en el equipo analizador de redes UNILYZER 902 instalados en un punto de conexión común (PAC) entre la empresa comercializadora (Electro Sur Este S.A.A.) y el consumidor (Hospital Regional Cusco), y de acuerdo a la cantidad de armónicos existentes y perjudiciales, originados por la utilización de equipos eléctricos que tienen elementos de la electrónica de potencia como son los rectificadores, transistores y tiristores, tomar medidas correctivas entre ellas plantear como alternativa de solución el diseño de filtros Pasivos.

✓ Se determinó la cantidad de armónicos existentes en un PAC, mediante la configuración e instalación adecuada del equipo analizador de redes trifásico de la marca UNILYZER 902, también se pudo observar que el orden de la distorsión armónica total (THD) es de 3.9199% muy por debajo del 8% de la (NTCSE), sin embargo, el armónico de quinto orden se encuentra en 8.898%, valor superior al 6% que indica la (NTCSE).

✓ Se estableció el método de solución adecuado frente a la mala calidad de producto en especial, frente a los armónicos de tensión, el cual consiste en realizar el diseño de un sistemas de filtros pasivos de tipo sintonizado, que están conformados por los elementos de bobinas($L=1.4239\text{mH}$), condensadores($C=197.632\mu\text{F}$), y resistencia ($R=0.01789\Omega$), conectados eléctricamente en serie, exclusivamente para mitigar el armónico de quinto orden que presenta una Distorsión Armónica Individual de 8.898%, de acuerdo a los resultados de la medición realizada en el lado secundario del transformador de potencia del Hospital Regional de Cusco.

✓ Se logró diseñar un filtro armónico pasivo de tipo sintonizado con las características exclusivas para un quinto armónico, considerando el criterio de diseño del factor de sintonía de 100% para el diseño del filtro, con los resultados obtenidos matemáticamente y las Normas internacionales como la IEEE 18 – 2002, cumplen adecuadamente dichas especificaciones establecidas, para un correcto funcionamiento del filtro diseñado, además se logró realizar una simulación de instalación del filtro pasivo en el software PSCAD. Con la finalidad de observar el comportamiento de la magnitud armonía de 5to orden antes y después de instalar el filtro diseñado en el (PAC), la simulación realizada muestra que, después de la instalación del filtro pasivo sintonizado se logra reducir aproximadamente en 89% el nivel de armónico individual el de 5to orden, dándose cumplimiento al objetivo planteado en el presente estudio de tesis.

5.3 TRABAJO FUTURO

En el desarrollo del presente estudio de tesis, en base a los resultados obtenidos en la medición, se corrobora la existencia de armónicos de tensión de orden 3°, 5°, 7°, 9°, 11°, siendo el de mayor cantidad el de orden 5° y que sobrepasan los límites establecidos en la (NTCSE), por lo que se optó por realizar el diseño de un filtro pasivo sintonizado a 300Hz, para mitigar el armónico de orden 5° con los valores calculados de $L = 1.4239mH$, $C = 197.632\mu F$, y $R = 17.893m\Omega$. Como trabajo futuro, se propone la instalación de un filtro activo para un número mayor de armónicos presentes en el PAC.

5.4 BIBLIOGRAFÍA.

- [1].- PONCE DE LEON CORDOVA, Jean Paul (2007), tesis de pregrado, **“Metodología para la Separación y Cuantificación de las Contribuciones Armónicas en un Punto de Acoplamiento Común (PAC)”** Lima. Perú.

- [2].- MINEM (1997) **“Norma Técnica de Calidad de los Servicios Eléctricos, (NTCASE)”**, Lima – Perú.

- [3].- Resolución OSINERGMIN N° 616-2008-OS-CD (2008) **“Base Metodológica Para la Aplicación de la Norma Técnica de Calidad de los Servicios Eléctricos”** Lima Perú.

- [4].- IEEE Std. 1159-2002 **“Recomendaciones Prácticas para el análisis de la calidad de producto”** USA.

- [5].- IEEE Std. 519-1992. Institute of Electrical and Electronics Engineers. **“Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems”** ISBN 1-55937-239-7. Estados Unidos, 1993

- [6].- DE LA ROSA, Francisco C, (2006) **“Harmonics and Power Systems”** Taylor & Francis.

- [7].- ENRIQUEZ HARPER, (2006) **“La calidad de la Energía Eléctrica en los Sistemas Eléctricos”** ED. Limusa, México.
- [8].- FELICE, Erick **“Perturbaciones Armónicas”** España, (2001).
- [9].- UNE- EN 60868-0. **“Evaluación de la Severidad de Flicker”** Ed. AENOR, España, 2002.
- [10].- Juan A. Martínez-Velasco **“Power System Transients- Parameter Determination”**, Taylor & Francis Group, (2010). USA.
- [11].- ARAUJO, Antonio E. y WASHINGTON L. A. Neves. **“Cálculo de Transitorios Electromagnéticos En Sistemas de Energía”**, Taylor,(2012), México.
- [12].- ASTUDILLO MORA, Leonardo; VASQUEZ VEGA, Alejandro; ROJAS SERRANO, Juan. **“Implementación de un Filtro Pasivo para la Compensación Armónica y Corrección del factor de Potencia”**, Enero- Junio (2016).
- [13].- MOLANO AGUAS, Juan Sebastián; TIQUE ROJAS, Raúl Ernesto, Tesis de pregrado, **“Diseño y Construcción de un kit de Filtros Pasivos para la mitigación de Corrientes Armónicas”**, universidad de la Salle- Faculta de Ingeniería tecnológica de Pereira (2013), Bogotá, Colombia.
- [14].- ALVARADO PERUSQUIA, Hector de Jesus. RAMIREZ SANCHES, Juan Manuel. Tesis de Pregrado **“Metodología Para el Análisis de Propagación y Filtrado de Armónico en Sistemas Eléctricos”**, Instituto Politécnico Nacional,(2010), México.
- [15].- ORELLANA VALIENTE, Cesar Alberto. Tesis de Pregrado **“Análisis de Distorsión Armónica en Redes de Distribución de Energía Eléctrica utilizando Matlab”**, Universidad de San Carlos, (2011), Guatemala.
- [16].- IEEE STANDAR 18-2002, (2002). **“Standar for Shunt Power Capacitor”**, USA.

ANEXO N° 01 MATRIZ DE CONSISTENCIA

PROBLEMAS	OBJETIVOS	HIPÓTESIS	VARIABLES
Problema General	Objetivo General	Hipótesis General	Variable Independiente
Los excesivos niveles de armónicos de tensión y corriente como un peligro inminente para los equipos que son considerados sensibles a las distorsiones armónicas de tensión y corriente.	Determinar mediante el estudio y el análisis las cantidades armónicas perjudiciales en una instalación eléctrica y plantear sus respectivos métodos de solución, para luego tomar las decisiones correctas que permitan el diseño adecuado de los filtros armónicos y su respectiva configuración, con base en la (NTCSE).	Si procedemos a diseñar e instalar un filtro para mitigar los armónicos en un punto de conexión común, se podrá reducir o eliminar los armónicos producidos por las cargas no lineales en un sistema eléctricas.	Los criterios y procedimientos de diseño basados en la (NTCSE), y las principales normas de renombre internacional (IEEE 519-1992)
Problema Específico	Objetivo Específico	Hipótesis Específico	Variable Dependiente
Salida de servicio de los quipos eléctricos utilizados en el hospital regional de Cusco, por efecto de	<p>1.- Describir la metodología básica para la evaluación y análisis de los armónicos de tensión y corriente en un "PAC"</p> <p>2.- Determinar la cantidad de armónicos permitidos que un</p>	1.- Al describir la metodología básica para la evaluación y análisis de los armónicos ocasionados en las redes de baja y media tensión, se determina exactamente la cantidad y magnitud haciendo referencia la (NTCSE)	Sistema de banco de condensadores y filtros armónicos instalados en el lado secundario del transformador de distribución


<p>la existencia de los armónicas.</p>	<p>usuario en baja y media tensión pueden insertar en un “PAC”</p> <p>3.- Establecer los métodos más adecuados para el control y eliminación de los armónicos en un “PAC”.</p> <p>4.- Implementar los filtros armónicos con las características necesarias para la reducción o eliminación de los armónicos de tensión existentes en un sistema eléctrico, básicamente en un “PAC”</p>	<p>2.- Al evaluar las mediciones realizadas por el equipo analizador de redes y comparando con la (NTCSE), se determina la cantidad de armónicos que un usuario puede insertar en un “PAC”.</p> <p>3.- Al establecer los métodos más adecuados para el control y eliminación de armónicos se determina el tipo de sistema de filtro más preciso a ser diseñado, teniendo, teniendo la necesidad básica de entender sus efectos secundarios que podrían ocasionar en los equipos eléctricos con componentes electrónicos.</p> <p>4.- Al implementar los filtros armónicos con las características necesarias para la reducción o eliminación de armónicos de tensión existentes en un sistema eléctrico, se logra la mitigación de armónicos básicamente en un “PAC”</p>	
--	--	--	--

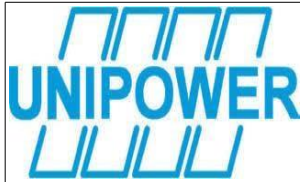
Table 2—Categories and typical characteristics of power system electromagnetic phenomena (see note)

Categories	Typical spectral content	Typical duration	Typical voltage magnitude
1.0 Transients			
1.1 Impulsive	5 ns rise	< 50 ns	
1.1.1 Nanosecond	1 μ s rise	50 ns – 1 ms	
1.1.2 Microsecond	0.1 ms rise	> 1 ms	
1.1.3 Millisecond			
1.2 Oscillatory	< 5 kHz	0.3–50 ms	0–4 pu ^a
1.2.1 Low frequency	5–500 kHz	20 μ s	0–8 pu
1.2.2 Medium frequency	0.5–5 MHz	5 μ s	0–4 pu
1.2.3 High frequency			
2.0 Short-duration root-mean-square (rms) variations			
2.1 Instantaneous		0.5–30 cycles	0.1–0.9 pu
2.1.1 Sag		0.5–30 cycles	1.1–1.8 pu
2.1.2 Swell			
2.2 Momentary		0.5 cycles – 3 s	< 0.1 pu
2.2.1 Interruption		30 cycles – 3 s	0.1–0.9 pu
2.2.2 Sag		30 cycles – 3 s	1.1–1.4 pu
2.2.3 Swell			
2.3 Temporary		>3 s – 1 min	< 0.1 pu
2.3.1 Interruption		>3 s – 1 min	0.1–0.9 pu
2.3.2 Sag		>3 s – 1 min	1.1–1.2 pu
2.3.3 Swell			
3.0 Long duration rms variations			
3.1 Interruption, sustained		> 1 min	0.0 pu
3.2 Undervoltages		> 1 min	0.8–0.9 pu
3.3 Overvoltages		> 1 min	1.1–1.2 pu
3.4 Current overload		> 1 min	
4.0 Imbalance			
4.1 Voltage		steady state	0.5–2%
4.2 Current		steady state	1.0–30%
5.0 Waveform distortion			
5.1 DC offset		steady state	0–0.1%
5.2 Harmonics	0–9 kHz	steady state	0–20%
5.3 Interharmonics	0–9 kHz	steady state	0–2%
5.4 Notching		steady state	
5.5 Noise	broadband	steady state	0–1%
6.0 Voltage fluctuations	< 25 Hz	intermittent	0.1–7% 0.2–2 P _{st} ^b
7.0 Power frequency variations		< 10 s	\pm 0.10 Hz
NOTE—These terms and categories apply to power quality measurements and are not to be confused with similar terms defined in IEEE Std 1366™-2003 [B27] and other reliability-related standards, recommended practices, and guides.			

^a The quantity *pu* refers to *per unit*, which is dimensionless. The quantity 1.0 pu corresponds to 100%. The nominal condition is often considered to be 1.0 pu. In this table, the nominal peak value is used as the base for transients and the nominal rms value is used as the base for rms variations.

^b Flicker severity index P_{st} as defined in IEC 61000-4-15:2003 [B15] and IEEE Std 1453™-2004 [B28].

	ANEXO N° 03	
	CALIDAD DE ENERGIA	
	HOSPITAL REGIONAL DE CUSCO	
Nombre	Información:	
Nombre	0010017629.upm	
Tipo	Archivo Temporal	
Ruta	C:\Users\Computer\Desktop\DO06_CLIENT_MAYO\CLIENT...	
Tamaño	1352.81 kB	
Created	2017-09-21 17:07:23	
Inicio de datos	2017-03-24 11:30:00	
Fin de datos	2017-04-01 10:30:00	
No Serie Medidor	25003875	
Medidores:	Unilyzer 902	
Versión de Hardware:	8	
Versión de Software:	2.24	
Construcción del Software:	5456	
Modelo de la Unidad y módulos:	541ff	
Opción de Hardware:	5	
Configuración de medición:	Tres-conductores 3 CT, 3 PT	
Estandar de medición:	Estilo de configuración	
Constantes:		
U1:	1	
U2:	1	
U3:	1	
U4:	0	
I1:	1	
I2:	1	
I3:	1	
I4:	0	
Intervalo de almacenamiento		
Corriente y voltaje:	15 min	
Potencia:	10 min	
Armónicos:	10 min	
Max Armónicos:	10 min	
Frecuencia:	10 min	
Flicker Pst:	10 min	
Flicker Plt:	120 min	
Potencias armónicas:	120 min	
Niveles nominales		
U1-U3:	220 V	
U4:	0 V	
I1-I3:	1000 A	
I4:	0 A	
Frecuencia nominal:	60Hz	
Desviación de Frecuencia:	1 %	
Número de armónicos:	50	
Número de ángulos de fase:	11	
Sag/swell		
Arreglo en la desviación de U1-U3:	20%	
Arreglo en la desviación de U4:	10000 V	
Tiempo pre arreglo:	100 ms	
Histéresis:	2%	
Intervalo de almacenamiento	2500 ms	
Registro forma de onda:	No	
Referencia Sliding:	No	
Transientes		
Arreglo en la desviación de U1-U3:	175 %	
Arreglo en la desviación de U4:	10000 V	
Configuración de Flicker:		
	Lámp de 220 V	
Puerto de la Computadora		

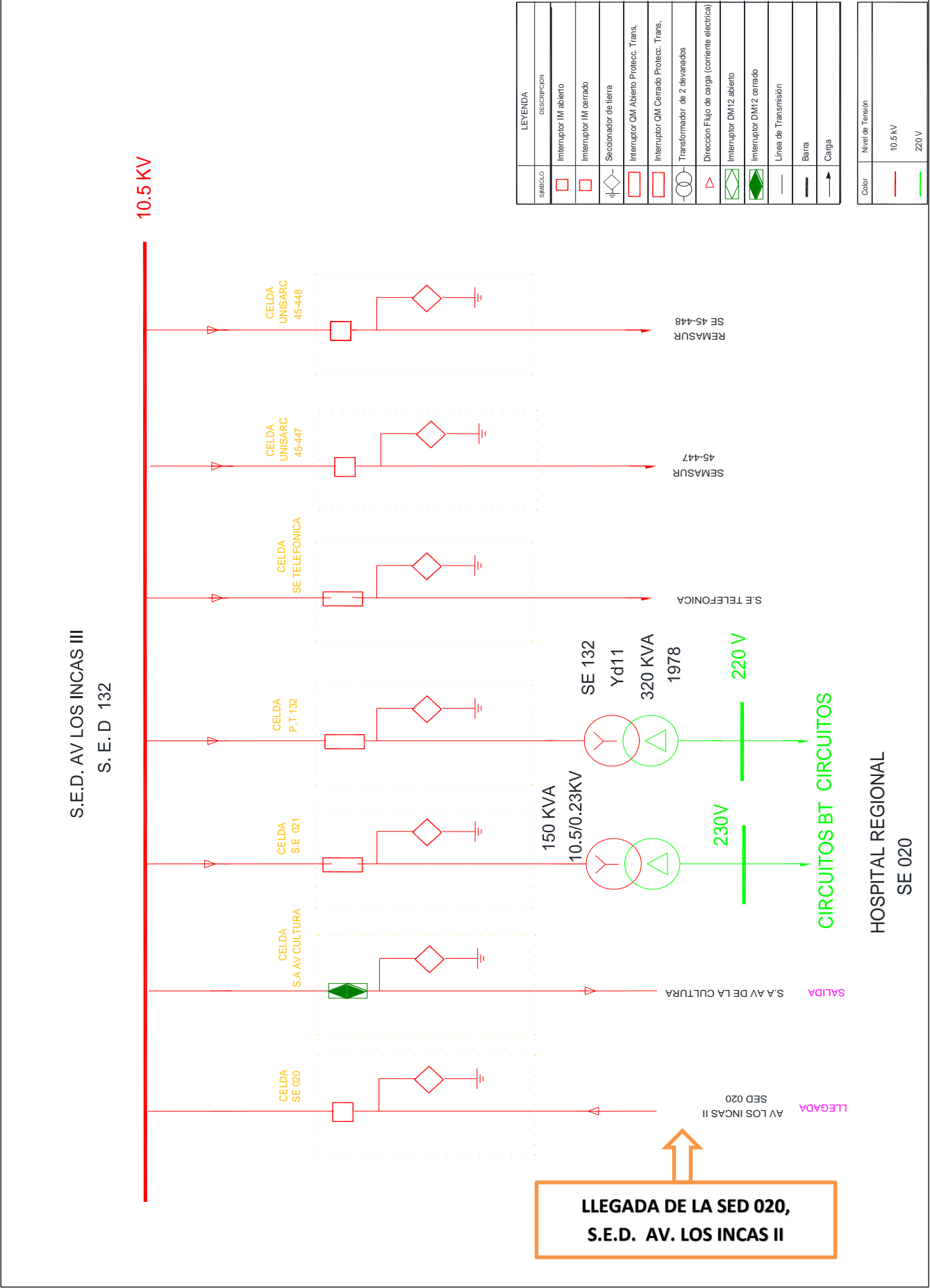


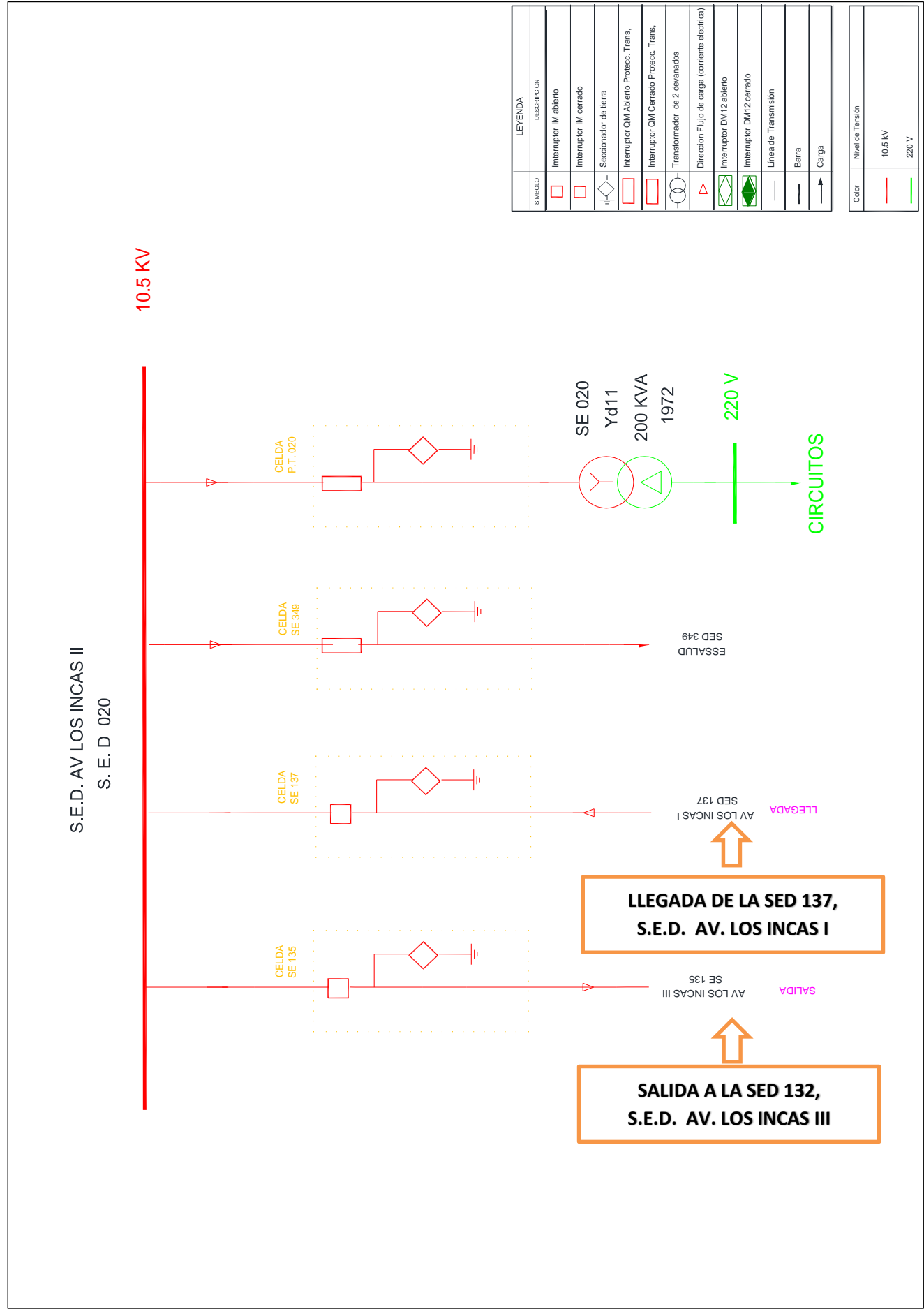
ANEXO N° 03

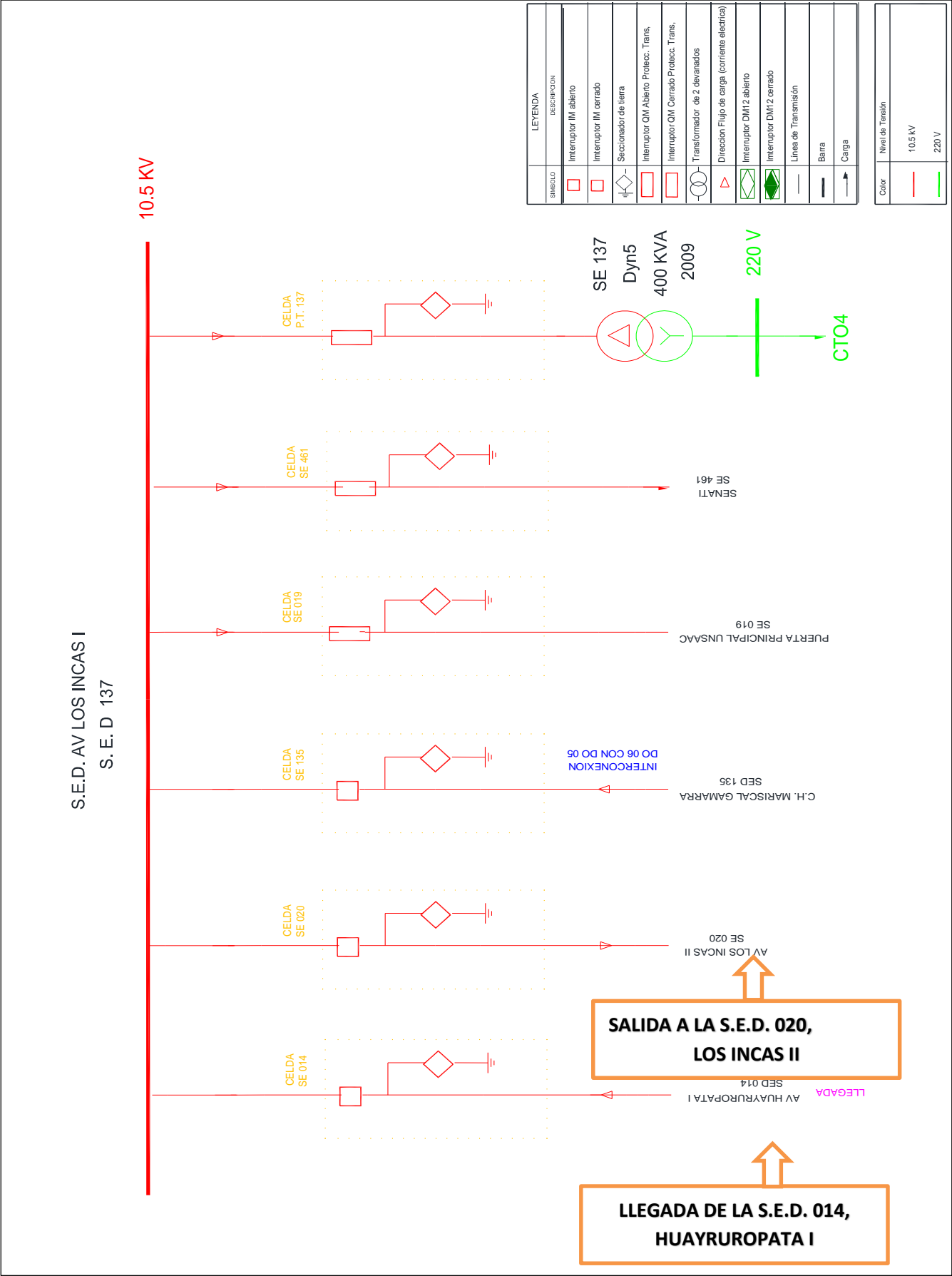
CALIDAD DE ENERGIA

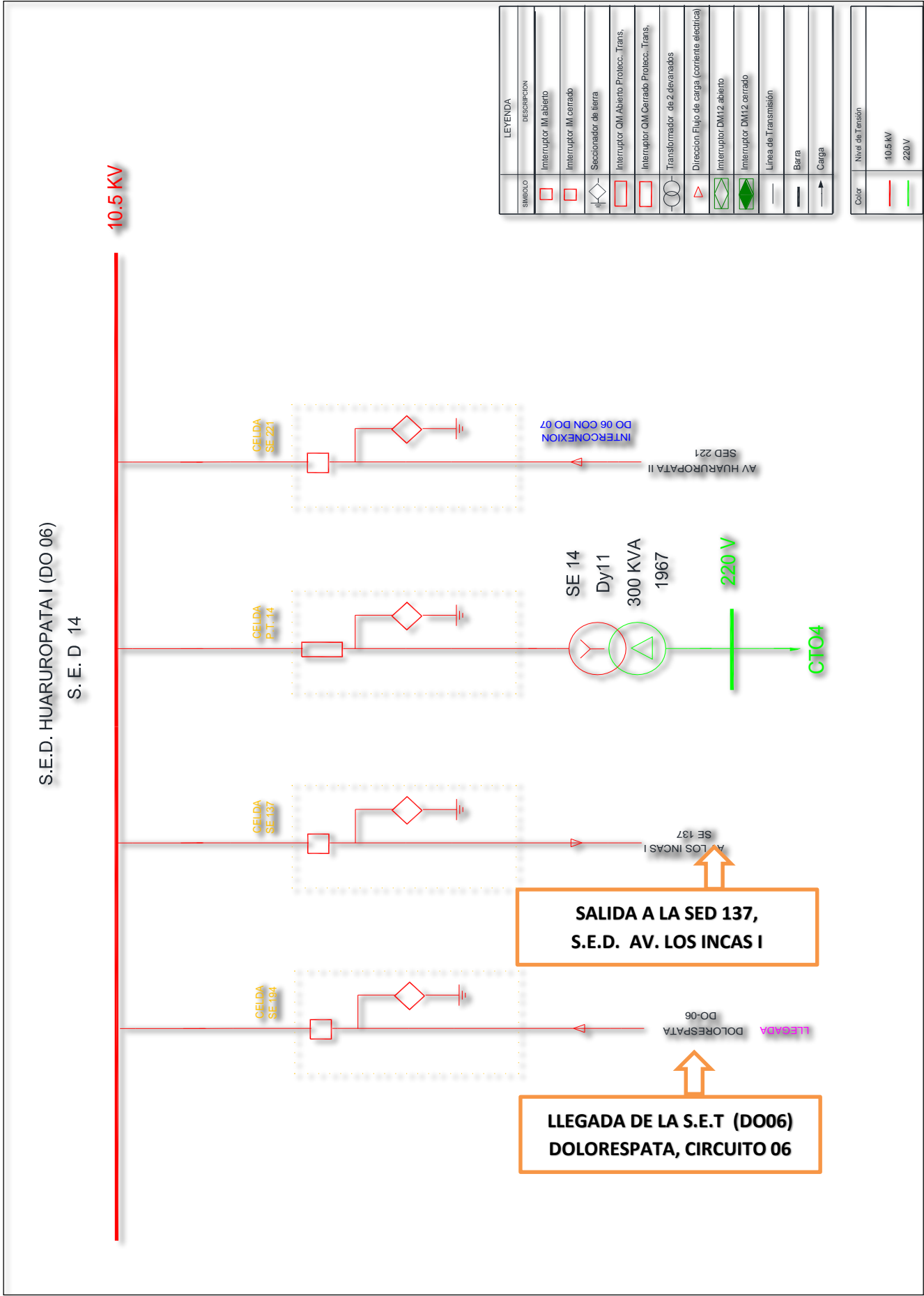
HOSPITAL REGIONAL DE CUSCO

Nombre	Información:
Rango de baudios:	57600
Número de timbradas antes de que responda el m...	1
Ethernet	
Dirección IP de la Unidad:	192.168.25.75
Usar puerta de enlace:	No
Configuraciones de sincronización del reloj	
Sincronización GPS:	Si
Zona Horaria:	0









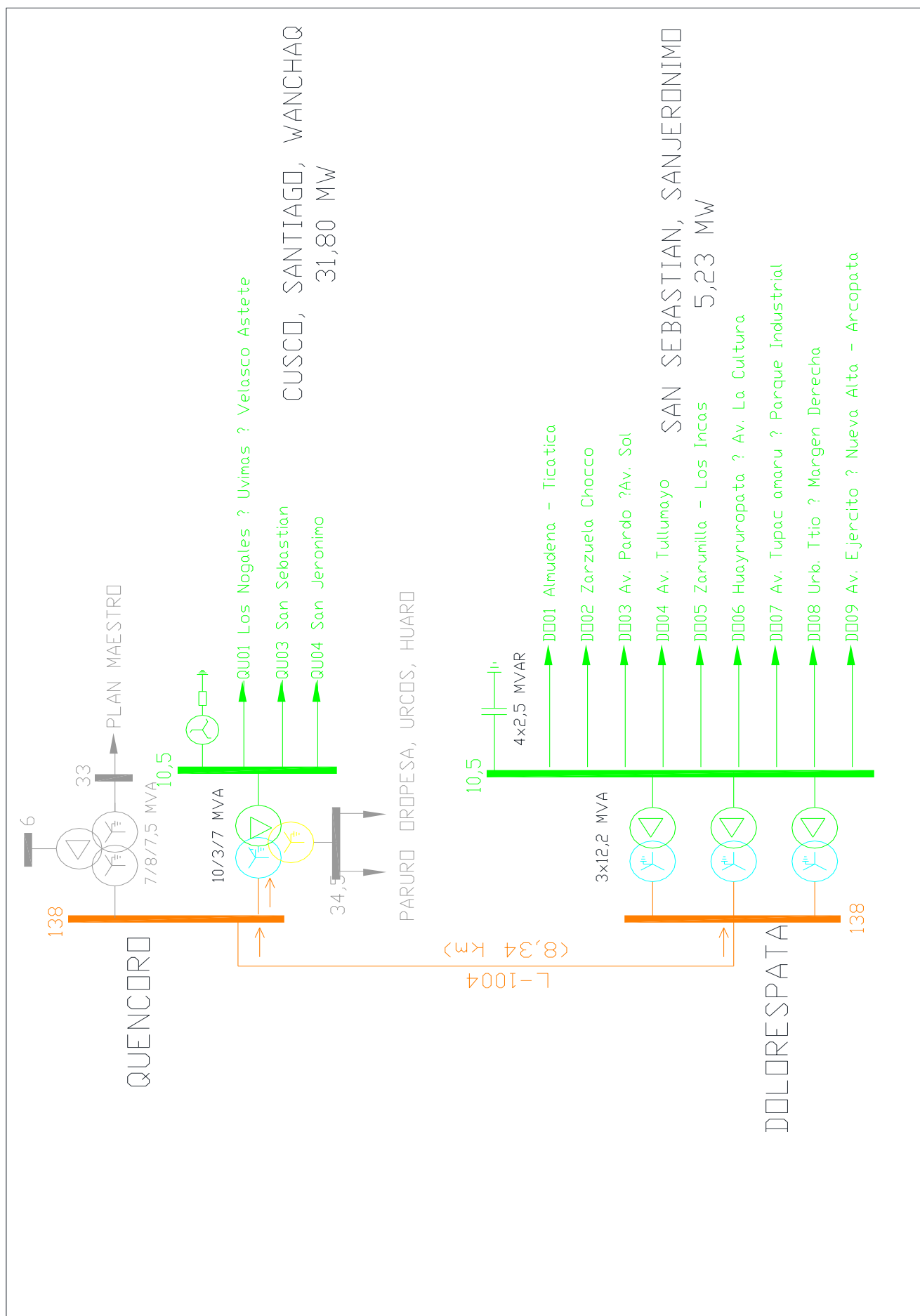


Diagrama unifilar Cusco. Conectado al SEIN.

